

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

ПАРХОМЕНКО ЛАРИСА ОЛЕКСІІВНА

УДК 656.2.022:519.8

ДИСЕРТАЦІЯ

РОЗВИТОК ТЕОРІЇ УПРАВЛІННЯ ЕКСПЛУАТАЦІЙНОЮ РОБОТОЮ ЗАЛІЗНИЧНОЇ СИСТЕМИ В УМОВАХ НЕВИЗНАЧЕНОСТЕЙ І РИЗИКІВ

05.22.01 – транспортні системи

27 – транспорт

Подається на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук

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



Л. О. ПАРХОМЕНКО

Науковий консультант

БУТЬКО Тетяна Василівна,
доктор технічних наук, професор

Харків – 2024

АНОТАЦІЯ

Пархоменко Л. О. Розвиток теорії управління експлуатаційною роботою залізничної системи в умовах невизначеностей і ризиків. – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 05.22.01 – транспортні системи (275 – транспортні технології). – Український державний університет залізничного транспорту, Міністерство освіти і науки України, Харків, 2024.

Дисертаційна робота присвячена вирішенню актуальної наукової проблеми для залізничного транспорту – розвитку теорії управління експлуатаційною роботою залізничної системи в умовах невизначеностей і ризиків.

Актуальність роботи обумовлена тим, що методи управління експлуатаційною роботою, використовувані на залізничному транспорті України, були створені ще за часів планової економіки і за сучасних умов посиленого впливу факторів невизначеності та ризику є недостатньо ефективними. Сучасні підходи не забезпечують достатній рівень надійності та точності для ухвалення рішень, що призводить до затримок у доставленні вантажів, збільшення операційних витрат і зниження загальної ефективності роботи залізничної системи. Такі проблеми погіршують якість обслуговування клієнтів і призводять до значних економічних втрат. У зв'язку з цим виникає необхідність розроблення нових підходів, методів і технологій управління, які дадуть змогу впевнено протидіяти негативному впливу факторів невизначеності, мінімізувати ризики, підвищити точність прогнозування та оптимізувати роботу залізничної системи, забезпечуючи безпеку і ефективність перевезень.

У першому розділі детально проаналізовано ключові аспекти управління ризиками та невизначеністю в контексті експлуатаційної діяльності залізничного транспорту. Аналіз включав розгляд онтології невизначеності та кількісне оцінювання ризиків, що дало змогу виявити основні джерела невизначеності, такі як

імовірнісна природа подій, неповнота інформації, раптові технічні неполадки, непередбачуваність транспортних потоків і зміни вимог щодо експлуатації систем, людський фактор тощо. Вивчення взаємозв'язку між концепціями ризику та невизначеності показало необхідність комплексного підходу для управління, що є критично важливим для забезпечення безпеки та ефективності експлуатаційних процесів. Було класифіковано ризики, які можуть виникати в технічних системах залізничного транспорту, для систематизації підходів із їхнього управління.

Ідентифікація ризиків стала важливим етапом у процесі управління експлуатаційною роботою залізничного транспорту, що дає змогу вчасно виявляти потенційні загрози та розробляти відповідні стратегії управління. Розглянуто різні методи кількісного оцінювання ризиків, такі як імовірнісно-наслідковий аналіз і аналіз впливу. Для ефективного кількісного оцінювання ризиків необхідно мати чітке розуміння вихідних даних, методів і моделей, а також систематично аналізувати ризики на різних етапах управління експлуатаційною діяльністю залізничного транспорту. Використання теорії Демпстера-Шафера дає змогу моделювати неоднозначність у знаннях іданих, що є важливим інструментом для оцінювання невизначеності та ухвалення рішень за відсутності точних даних.

У другому розділі наведені результати аналізу сучасних наукових досліджень у сфері управління експлуатаційною роботою залізничного транспорту, під час якого було виявлено кілька загальних недоліків. По-перше, більшість досліджень не забезпечують єдиного підходу до управління ризиками та невизначеністю, що ускладнює порівняння та адаптацію результатів до конкретних умов. По-друге, деякі роботи недостатньо враховують широкий спектр випадкових факторів, навіть таких, як сезонність, зміни попиту, мінливість технологічного середовища. Сучасні математичні моделі часто мають обмеження у прогнозуванні та адаптації до швидко змінюваних умов технологічного процесу та оперативної обстановки, що підтверджує необхідність розроблення більш комплексних і універсальних підходів для управління невизначеністю і ризиками.

У третьому розділі подано результати аналізу експлуатаційної діяльності залізничної системи України, які демонструють негативні тенденції у зменшенні

обсягів перевезень, що посилюється через збройну агресію та інші зовнішні фактори. Було виявлено, що попри численні негативні техніко-економічні фактори, такі як критичний рівень зносу інфраструктури, нестача магістральних і маневрових локомотивів, персоналу, деякі фактори свідчать про те, що причиною цих небажаних трендів є і такі, що мають організаційну природу, а саме застарілі технології управління та методи обробки інформації.

Проаналізовано масиви даних, надані системою АСК УЗ Є і використовувані для ухвалення рішень у сфері управління експлуатаційною роботою залізничного транспорту. Використано сучасні математичні методи аналізу даних, такі як моделі автокореляції, методи вейвлет-, R/S- та інформаційного аналізу часових рядів. Під час аналізу було виявлено високий рівень волатильності та антиперсистентності даних, що свідчить про необхідність застосування складних методів прогнозування та розроблення нових підходів для оперування даними з високим рівнем невизначеності.

У четвертому розділі на прикладах класичних задач UEP продемонстровано підходи, спрямовані на зниження рівня невизначеностей як епістемічного, так і алеаторного типів, рівень яких дедалі лише зростає, зважаючи на економічні, політичні та інші виклики. Зокрема, доведено важливість такого підходу для зменшення рівня невизначеності, як уточнення моделей. Для цього стратегічну управлінську задачу розрахунку ПФП було формалізовано у вигляді оптимізаційної моделі, яка реалізує уточнені розрахунки цільового критерію за рахунок урахування залежності витрат вагоногодин на переробку вагонопотоків від рівня завантаженості технічних станцій. На прикладі задачі планування місцевої роботи на залізничній дільниці продемонстровано застосування комбінованого підходу, який одночасно поєнує принципи стохастичної та робастної оптимізації. Задачу планування роботи збірних поїздів, які обслуговують залізничну дільницю місцевої роботи, формалізовано у вигляді оптимізаційної моделі, цільова функція якої реалізує принцип мінімаксу. Аналізуючи результати оптимізації розроблених моделей, доведено ефективність запропонованих підходів як механізмів нівелювання негативного впливу факторів невизначеності в системах управління.

У п'ятому розділі наведено результати аналізу проблеми недотримання строків доставлення вантажів залізничним транспортом в Україні, зроблено висновок, що найбільш оптимальним рівнем прикладення організаційних і управлінських зусиль для вирішення цієї проблеми є лінійний, а саме рівень технічних, у першу чергу сортувальних станцій. У процесі обробки вагонопотоків саме на ці елементи залізничної транспортної системи витрачають велику кількість вагоно-годин внаслідок невиробничих простоїв вагонів.

Розроблено нейромережеву модель визначення пріоритетності обробки і відправлення вагонів зі станції. Модель класифікує вантажні вагони, що надійшли в систему розформування-формування, за такими ознаками, як затримка, залишковий час прямування і провізна плата, ідентифікуючи вагони, які мають потенційно вищі шанси недотримання строку доставлення вантажу та/або рівень відповідних негативних наслідків. Однак було встановлено, що така модель, попри зручність і відносну простоту, не відповідає вимогам прозорості та варіабельності, що висувають до моделей, які можуть бути використані як основа для побудови виробничих СППР. Крім того, виявлено, що, зокрема, у системі АСК ВП УЗ Є існують додаткові джерела інформації, яку можна використати для оцінювання можливості недотримання вагоном строку доставлення вантажу. Ця інформація може бути неточною і певною мірою навіть суперечити інформації з інших джерел, як, наприклад, ті самі нейромережеві моделі або експертні системи тощо, однак за умов невизначеності, навіть неповної, нечіткої, неточної або недостатньої інформації, будь-яка додаткова інформація має цінність для підвищення якості ухвалення управлінських рішень. Проблема полягає лише в механізмах її використання.

У рамках розроблення нової моделі запропоновано метод композиції інформації з різних джерел на основі положень теорії Демпстера-Шафера. Також запропоновано підхід для оцінювання пріоритетності обробки вагонів на основі визначення ступеня ризику недотримання строку доставлення. Для цього запропоновано модель, яка одночасно враховує весь спектр можливих подій у вигляді розподілу впевненості або ймовірності, який може бути сформований на

основі інформації, агрегованої з різних джерел. Така модель забезпечує високу точність оцінок завдяки застосуванню запропонованої функції щільності ризику в комбінації з нелінійною штрафною функцією, яка враховує не лише сам факт недотримання строку доставлення, але і залежність наслідків від тривалості запізнення.

Отже, для вирішення задачі визначення пріоритетності обробки вагонів розроблено нову високоточну модель оцінювання ризику. Для вирішення проблеми недотримання строків доставлення вантажів на мережі АТ «Укрзалізниця» розроблено математичну модель векторної оптимізації для управління роботою технічної станції, яка враховує критерії сумарних експлуатаційних витрат і сумарної величини ризику, пов'язаного зі штрафними санкціями у вигляді окремих цільових функцій. Розроблена модель векторної оптимізації використовує сформовану модель оцінювання ризику, а також разом із запропонованою процедурою її оптимізації, яка використовує ієрархічний алгоритм SPEA-2, являє собою нову технологію ризик-менеджменту для вирішення проблеми недотримання строків залізничного доставлення вантажів за допомогою оперативного планування роботи технічних станцій.

Розроблена технологія реалізована як програмний продукт у середовищі Matlab. Під час аналізу результатів проведеного моделювання на абстрактному полігоні встановлено, що використання розробленої технології ризик-менеджменту на базі сформованих моделей оцінювання ризику та моделі оперативного планування роботи технічної станції дало можливість зменшити загальні експлуатаційні витрати на 7,99 % і знизити рівень ризику, пов'язаного з можливим недотриманням строків доставлення вантажів, на 62,4 %.

У шостому розділі на основі проведеного аналізу встановлено, що розвиток туризму та нові стандарти обслуговування пасажирів потребують сучасних технологій управління інтермодальним трафіком. Високошвидкісний транспорт є головним елементом цієї системи, але його ефективність залежить від організації(чого?).

У результаті проведеного аналізу доведено, що невизначеність ускладнює оцінювання потенційних і реальних пасажиропотоків, особливо на маршрутах із туристичними та регулярними поїздками. Основними факторами є час руху та вартість квитка, але їх урахування пов'язане з суб'єктивним сприйняттям.

Для вирішення цих проблем розроблено нечітку модель оцінювання корисності перевезення з урахуванням невизначеності вибору.

З метою підвищення використання швидкісних поїздів як допоміжного залізничного транспорту для туристичних подорожей запропоновано використати технологію пропускання зупинок, що дає змогу скоротити час подорожі та підвищити привабливість туристичних маршрутів, забезпечуючи прибутковість перевезень.

Створена оптимізаційна модель планування роботи пасажирських швидкісних поїздів на напрямку, яка використовує розроблену функцію корисності для точного оцінювання чисельності пасажирів, дає змогу отримати схему курсування поїздів на основі принципу пропускання зупинок.

Розроблена прогностична модель на основі НМ генеративно-змагальної архітектури (англ. GAN) забезпечила високу точність прогнозування та подолати невизначеність, пов'язану з неповною інформацією щодо історичних даних. Така модель призначена для підготовки вихідних даних для розрахунку у вигляді потенційних пасажиропотоків.

Сформована процедура оптимізації в середовищі Matlab, заснована на ГА, дала змогу знайти оптимальні параметри для досягнення екстремуму цільової функції з достатньою точністю.

Під час аналізу результатів моделювання доведено, що використання розробленої моделі дає змогу зберегти до 90 % потенційного туристичного пасажиропотоку та забезпечити обробку близько 50 % пасажирського трафіка між проміжними станціями.

У цьому розділі проаналізовано інтермодальні контейнерні перевезення, зазначено про головну роль залізничного транспорту в сучасних глобальних логістичних ланцюгах. Однак, незважаючи на його економічні та екологічні

переваги, нестаціонарний характер контейнеропотоків створює суттєві труднощі в їх прогнозуванні та управлінні. Ця нестаціонарність ускладнює планування ресурсів і підвищує ризики порушення графіків доставлення контейнерних партій до портів.

Дослідження виявило, що традиційні методи прогнозування не справляються з динамічними змінами в контейнеропотоках на залізничних терміналах. Нестационарність контейнеропотоків є значним джерелом невизначеності, яка впливає як на процес формування контейнерних поїздів, так і управління ресурсами. Важливою проблемою є те, що змінна інтенсивність прибуття вантажів ускладнює точність прогнозів і моделювання логістичних процесів.

З метою подолання цих труднощів розроблено математичну модель управління формуванням контейнерних поїздів, яка включає систему обмежень і цільову функцію, що враховує витрати, пов'язані з експлуатацією, ризики затримок і недовантаження суден. Модель використовує сучасні методи оптимізації, зокрема ГА, що дають змогу враховувати ймовірнісні складові процесу формування контейнерних поїздів.

Результати моделювання показують, що запропонована модель дає змогу зменшити негативний вплив невизначеності, що виникає через змінність контейнеропотоків. Вона забезпечує ефективне планування та знижує затримки, підвищуючи ефективність перевезень і забезпечуючи своєчасне доставлення вантажів. Оптимізація процесу формування контейнерних поїздів, зокрема врахування всіх імовірнісних складових і ризиків, є критично важливою для забезпечення стабільності та надійності інтермодальних перевезень.

Отже, ефективність розробленої моделі полягає в її здатності мінімізувати вплив факторів невизначеності, які виникають як у процесі накопичення контейнерів, так і процесі їх транспортування залізницею до портів. Запропонована модель сприяє зниженню експлуатаційних витрат і підвищенню точності прогнозування, що є важливим для сучасних логістичних систем.

У восьмому розділі проаналізовано перспективи розвитку використання залізничного транспорту у сфері контейнерних інтермодальних перевезень і можливості його успішної конкуренції з автомобільним транспортом, зокрема на

середніх і коротких дистанціях. Виявлено, що існують значні обмеження для розвитку використання автомобільного транспорту в контексті міжнародних інтермодальних перевезень, такі як перевантаженість контейнерних терміналів, недостатня пропускна спроможність автодоріг, особливо в міських припортових зонах, низька вантажопідйомність, екологічні обмеження тощо. Однак і залізничний транспорт, особливо на середніх і коротких відстанях, має серйозні недоліки, такі як недостатня мобільність, необхідність використання проміжного інтермодального транспорту на території порту автомобільного транспорту на «останній милі».

Для подолання цих недоліків розроблено нову технологію швидкого залізничного доставлення контейнерів у рамках системи інтермодальних перевезень на основі інтеграції залізничної та портової інфраструктури завдяки використанню автоматичних вантажних систем MetroCargo™, підвищенню мобільності залізничного транспорту, використанню модульних контейнерних поїздів типу CargoSprinter.

Головним елементом такої технології є модель управління, яка вирішує задачу розрахунку оптимального за критерієм сумарних експлуатаційних витрат плану виконання операцій учасниками перевізного процесу в робастній постановці.

Розроблена модель управління враховує високий рівень невизначеності, зокрема пов'язаний із тривалістю доступності вантажних фронтів підприємств, шляхом використання інтервальних чисел для робастного планування. Оптимізаційна процедура, базована на спеціально розробленому каскадному ГА, дає змогу побудувати надійний план, який навіть за реалізації найгіршої комбінації всіх факторів невизначеності залишиться актуальним. Моделювання показало, що нова технологія забезпечує зниження витрат і підвищення ефективності для доставлення контейнерів порівняно з традиційними методами.

Економічні розрахунки підтверджують високу ефективність впровадження нових технологій із внутрішньою нормою дохідності 49,5 % і строком окупності 4,44 року. Ці показники свідчать про економічну вигоду та привабливість нової технології для вантажовідправників.

Практичне значення отриманих результатів роботи підтверджено відповідними актами впровадження в ДП АТ «Укрзалізниця». Також результати, отримані в дисертаційній роботі, використано в навчальному процесі кафедри управління експлуатаційною роботою УкрДУЗТ для підготовки здобувачів вищої освіти (бакалаврів і магістрів) за спеціальністю 275/275.02 – Транспортні технології (на залізничному транспорті), а також слухачів навчально-наукового центру освіти дорослих.

Ключові слова: фактори невизначеності, фактори ризику, залізничний транспорт, управління експлуатаційною роботою, транспортна система.

ABSTRACT

Parkhomenko L. O. Development of the theory of operational work management of the railway system under conditions of uncertainty and risks. – Qualifying scientific work as a manuscript.

Dissertation for the degree of Doctor of Engineering Sciences in Specialty 05.22.01 Transport Systems (275 Transport Technologies). – Ukrainian State University of Railway Transport, Ministry of Education and Science of Ukraine, Kharkiv, 2024.

The dissertation is devoted to solving a significant scientific problem for railway transport - the development of the theory of managing the operational work of the railway system under conditions of uncertainty and risks. The relevance of the work is due to the fact that the methods of managing operational work used in Ukrainian railway transport were developed during the planned economy era and are insufficiently effective under modern conditions of increased uncertainty and risk factors. Existing approaches do not provide a sufficient level of reliability and accuracy in decision-making, leading to delays in cargo delivery, increased operational costs, and reduced overall efficiency of the railway system. These issues degrade the quality of customer service and result in significant economic losses. Therefore, there is a need to develop new approaches, methods, and management technologies that can confidently counteract the negative impact of uncertainty factors, minimize risks, improve forecasting accuracy, and optimize the railway system's operations, ensuring the safety and efficiency of transportation.

In the first section, a detailed analysis of the key aspects of risk and uncertainty management in the context of railway transport operations is conducted. The analysis includes examining the ontology of uncertainty and quantitative risk assessment, identifying the main sources of uncertainty such as the probabilistic nature of events, incomplete information, sudden technical malfunctions, unpredictability of traffic flows, and changes in operational requirements, as well as the human factor. The study of the relationship between the concepts of risk and uncertainty showed the need for a comprehensive management approach, which is critically important for ensuring the safety and efficiency of operational processes. Risks that may arise in the technical systems of

railway transport were classified, allowing for the systematization of approaches to their management.

Risk identification proved to be an important stage in the process of managing railway transport operations, allowing timely detection of potential threats and the development of management strategies. Various methods of quantitative risk assessment, such as probabilistic-consequence analysis and impact analysis, were considered. Effective quantitative risk assessment requires a clear understanding of input data, methods, and models, as well as a systematic analysis of risks at different stages of managing railway transport operations. The use of Dempster-Shafer theory allows for modeling ambiguity in knowledge and data, which is an important tool for assessing uncertainty and making decisions in the absence of accurate data.

The second section presents the results of analyzing existing scientific research in the field of railway transport operations management, revealing several common shortcomings. Firstly, most studies do not provide a unified approach to risk and uncertainty management, complicating the comparison and adaptation of results to specific conditions. Secondly, some works insufficiently consider a wide range of random factors, such as seasonality, demand changes, and the variability of the technological environment. Existing mathematical models often have limitations in forecasting and adapting to rapidly changing conditions of the technological process and operational situation, confirming the need to develop more comprehensive and universal approaches to managing uncertainty and risks.

The third section presents the results of analyzing the operational activities of the Ukrainian railway system, demonstrating negative trends in the reduction of transportation volumes exacerbated by armed aggression and other external factors. It was found that despite numerous negative technical and economic factors, such as critical infrastructure wear, lack of mainline and shunting locomotives, and personnel shortages, which are causes of these negative phenomena, some factors indicate that the causes of these undesirable trends are also organizational in nature, specifically outdated management technologies and information processing methods.

An analysis of data arrays provided by the automated railway transport management system ASC UZ E, used for decision-making in railway transport operations management, was conducted. Modern mathematical data analysis methods, such as autocorrelation models, wavelet, R/S, and information analysis of time series, were used. The analysis revealed a high level of volatility and antipersistence of the data, indicating the need for complex forecasting methods and the development of new approaches to handling data with a high level of uncertainty.

In the fourth section, using classical operational management problems as examples, approaches aimed at reducing both epistemic and aleatory uncertainties were demonstrated, with their levels increasingly rising due to economic, political, and other challenges. In particular, the importance of model refinement as a method to reduce uncertainty was proven. To this end, the strategic management task of calculating the train formation plan (TFP) was formalized as an optimization model that incorporates refined calculations of the target criterion by accounting for the dependence of wagon-hour processing costs on the load level of technical stations. The application of a combined approach, integrating both stochastic and robust optimization principles, was demonstrated through the example of a local work planning task on a railway section. The task of planning the operation of local trains serving the railway section was formalized as an optimization model, with its objective function based on the minimax principle. The analysis of the optimization results of the developed models confirmed the effectiveness of the proposed approaches as mechanisms for mitigating the negative impact of uncertainty factors in management systems.

The fifth section presents the results of analyzing the problem of missed cargo delivery deadlines by railway transport in Ukraine. It was concluded that the most optimal level of application of organizational and managerial efforts to solve this problem is the linear level, namely the level of technical and primarily sorting stations. During the processing of wagon flows at these elements of the railway transport system, a large number of wagon-hours are spent due to unproductive wagon downtime.

A neural network model was developed to determine the priority of processing and dispatching wagons from the station. The model classifies freight wagons entering the

disassembly-formation system based on characteristics such as delay, remaining travel time, and freight charges, identifying wagons with a higher likelihood of missing the delivery deadline and/or associated negative consequences. However, it was found that this model, despite its convenience and relative simplicity, does not meet the transparency and variability requirements set for models used as the basis for decision support systems (DSS). Additionally, it was found that in the ASC VP UZ E system, there may be additional sources of information that can be used to assess the possibility of a wagon missing the delivery deadline. This information may be ambiguous and somewhat contradictory to information from other sources, such as neural network models or expert systems. However, under conditions of uncertainty, including due to incomplete, vague, inaccurate, or insufficient information, any additional information is valuable from the perspective of improving decision-making quality. The problem lies only in the mechanisms of its use.

A method for composing information from different sources based on the Dempster-Shafer theory was proposed within the framework of developing a new model. An approach to assessing the priority of wagon processing based on determining the risk of missing the delivery deadline was also proposed. For this purpose, a model was proposed that simultaneously considers the entire range of possible events in the form of a distribution of confidence or probability, which can be formed based on information aggregated from different sources. This model ensures high accuracy of assessments through the application of the proposed risk density function in combination with a nonlinear penalty function that considers not only the fact of missing the delivery deadline but also the dependence of consequences on the duration of the delay.

Thus, a new high-precision risk assessment model was developed to solve the problem of determining the priority of wagon processing. To address the problem of missed cargo delivery deadlines on the PJSC Ukrzaliznytsia network, a mathematical vector optimization model for managing the work of a technical station was developed. The model considers the criteria of total operational costs and the total risk associated with penalties in the form of separate objective functions. Thus, the developed vector optimization model, which in turn uses the formed risk assessment model along with the

proposed optimization procedure, which uses the hierarchical SPEA-2 algorithm, represents a new risk management technology for solving the problem of missed railway cargo delivery deadlines through the operational planning of technical station work.

The developed technology was implemented as a software product in the Matlab environment. The analysis of the simulation results on an abstract polygon showed that the use of the developed risk management technology based on the formed risk assessment models and the technical station work operational planning model allowed for reducing total operational costs by 7.99 % and lowering the risk level associated with possible missed cargo delivery deadlines by 62.4 %.

In the sixth section, based on the conducted analysis, it was established that the development of tourism and new passenger service standards require modern intermodal traffic management technologies. High-speed transport is a key element of this system, but its efficiency depends on the organization. The analysis showed that uncertainty complicates the assessment of potential and actual passenger flows, especially on routes with tourist and regular trips. The main factors are travel time and ticket cost, but their consideration is associated with subjective perception. To solve these problems, a fuzzy model for assessing the utility of transportation considering the uncertainty of choice was developed.

To increase the use of high-speed trains as auxiliary railway transport for tourist trips, a skip-stop technology was proposed, which reduces travel time and enhances the attractiveness of tourist routes, ensuring the profitability of transportation. An optimization model for planning the work of passenger high-speed trains on the route, which uses the developed utility function for accurately estimating the number of passengers, allows for obtaining a train schedule based on the skip-stop principle.

A forecasting model based on the generative adversarial network (GAN) architecture provided high forecasting accuracy and overcame the uncertainty associated with incomplete historical data. This model is intended for preparing input data for calculation in the form of potential passenger flows. The optimization procedure developed in the Matlab environment, based on genetic algorithms, allowed for finding

optimal parameters to achieve the extremum of the objective function with sufficient accuracy.

The analysis of the simulation results proved that the use of the developed model allows for preserving up to 90% of the potential tourist passenger flow and processing about 50 % of the passenger traffic between intermediate stations.

In the seventh section, an analysis of intermodal container transport was conducted, confirming the key role of railway transport in modern global logistics chains. However, despite its economic and environmental benefits, the non-stationary nature of container flows creates significant difficulties in forecasting and management. This non-stationarity complicates resource planning and increases the risks of schedule disruptions for container shipments to ports.

The study revealed that traditional forecasting methods fail to cope with the dynamic changes in container flows at railway terminals. The non-stationarity of container flows is a significant source of uncertainty affecting both the process of forming container trains and resource management. An important problem is that the variable intensity of cargo arrivals complicates the accuracy of forecasts and logistics process modeling.

To overcome these challenges, a mathematical model for managing the formation of container trains was developed. This model includes a system of constraints and an objective function that considers operating costs, risks of delays, and underloading of ships. The model employs modern optimization methods, particularly genetic algorithms, which allow for the consideration of probabilistic components in the process of forming container trains.

Simulation results indicate that the proposed model effectively reduces the negative impact of uncertainty arising from the variability of container flows. It ensures efficient planning and reduces delays, thereby enhancing transportation efficiency and ensuring timely delivery of goods. Optimizing the container train formation process, particularly by accounting for all probabilistic components and risks, is crucial for ensuring the stability and reliability of intermodal transportation.

Thus, the effectiveness of the developed model lies in its ability to minimize the impact of uncertainty factors that arise both in the process of container accumulation and

in their railway transportation to ports. The proposed model helps reduce operational costs and improve forecasting accuracy, which is important for modern logistics systems.

In the eighth section, an analysis of the prospects for the development of railway transport in the field of container intermodal transportation and its potential to successfully compete with road transport, including on medium and short distances, was conducted. It was found that there are significant limitations to the development of road transport in the context of international intermodal transportation, such as the congestion of container terminals, insufficient road capacity, especially in urban port zones, low load capacity, environmental restrictions, and more. However, railway transport, especially on medium and short distances, also has serious disadvantages, such as insufficient mobility and the need for intermediate intermodal transport in port areas using road transport for the «last mile».

To overcome these drawbacks, a new technology for fast railway delivery of containers within the intermodal transportation system was developed. This technology integrates railway and port infrastructure through the use of automatic cargo systems like MetroCargo™ and enhances the mobility of railway transport using modular container trains such as CargoSprinter.

The key element of this technology is a management model that solves the problem of calculating the optimal plan for operations by transport process participants based on the criterion of total operating costs in a robust setting. The developed management model considers a high level of uncertainty, particularly related to the availability duration of enterprise loading fronts, by using interval numbers for robust planning. The optimization procedure, based on a specially developed cascading genetic algorithm, allows for the creation of a reliable plan that remains effective even under the worst combination of all uncertainty factors. Modeling in the MATLAB environment demonstrated that the new technology reduces costs and improves efficiency in container delivery compared to traditional methods.

Economic calculations confirm the high effectiveness of implementing the new technologies, with an internal rate of return of 49.5% and a payback period of 4.44 years.

These indicators highlight the economic benefit and attractiveness of the new technology for shippers.

The practical significance of the results obtained in this work is confirmed by corresponding implementation acts at the State Enterprise in JSC «Ukrzaliznytsia». The results obtained in the dissertation are also used in the educational process of the Department of Operational Management at the Ukrainian State University of Railway Transport for training higher education seekers (bachelors and masters) in the specialty 275/275.02 - Transport Technologies (on railway transport), as well as for the listeners of the Educational and Scientific Center for Adult Education.

Keywords: uncertainty factors, risk factors, railway transport, operational work management, transport system.

Список публікацій здобувача

Наукові праці, у яких опубліковані основні наукові результати дисертації:

1. Panchenko S. V., Butko T. V., Prokhorchenko A. V., Parkhomenko L. O. Formation of an automated traffic capacity calculation system of rail networks for freight flows of mining and smelting enterprises. *Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu*. 2016. 2. P. 93–99 (*видання індексовано в базі Scopus, Q3*).

2. Пархоменко Л. О., Лавренюк В. О. Розроблення нечіткої моделі прогнозування кореспонденцій пасажирів у швидкісному русі на основі принципів просторової взаємодії. *Збірник наукових праць Українського державного університету залізничного транспорту*. 2016. 164. С. 15–22.

3. Панченко С. В., Бутко Т. В., Прохоров В. М., Пархоменко Л. О. Удосконалення технології організації вагонопотоків шляхом формування автоматизованої системи розрахунку і забезпечення виконання плану формування поїздів. *Вісник Східноукраїнського національного університету імені Володимира Даля*. 2017. 3. С. 136–142.

4. Пархоменко Л. О., Серпокрилов В. Ю., Коваленко Д. М. Аналіз динаміки пасажиропотоків по Україні в умовах швидкісних перевезень. *Збірник наукових праць Українського державного університету залізничного транспорту*. 2017. (173). С. 143–148.

5. Пархоменко Є. О., Пархоменко Л. О. Формування інформаційно-керуючої системи стратегічного планування швидкісних пасажирських перевезень на залізничному транспорті. *Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті*. 2018. 5. С. 3–9.

6. Prokhorchenko A., Panchenko A., Parkhomenko L., Nesterenko H., Muzykin M., Prokhorchenko H., Kolisnyk A. Forecasting the estimated time of arrival for a cargo dispatch delivered by a freight train along a railway section. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2019. 3/3(99). P. 30–38 (видання індексовано в базі Scopus, Q3).

7. Butko T., Kostiennikov O., Parkhomenko L., Prokhorov V., Bogomazova G. Forming an automated technology to manage freight transportation along a direction. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2019. 1/13(97) P.6-13| DOI: 10.15587/1729-4061.2019.156098 (видання індексовано в базі Scopus, Q3).

8. Butko T., Prokhorov V., Kolisnyk A., Parkhomenko L. Devising an automated technology to organize the railroad transportation of containers for intermodal deliveries based on the theory of point processes. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2020. 1/3(103). P. 6–12 (видання індексовано в базі Scopus, Q3).

9. Butko T. V., Prokhorov V. M., Parkhomenko L. O., Prokopov A. O. Improvement of technology of passenger intermodal transportation with involvement of railway transport in the conditions of tourism development. *Science and Transport Progress. Bulletin of Dnipropetrovsk National University of Railway Transport*. 2021. № 1 (91). P. 37–50. DOI: 10.15802/stp2021/228106.

10. Розробка процедури формування схеми маршрутів поїздів для автоматизованої системи управління швидкісними пасажирськими перевезеннями / Л. О. Пархоменко, В. М. Прохоров, Т. Ю. Калашнікова та ін. *Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті*. 2021. 3(26). С. 18–26.

11. Parkhomenko L., Butko T., Prokhorov V., Kalashnikova T., Golovko T. Building a model for planning rapid delivery of containers by rail under the conditions of intermodal transportation based on robust optimization. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2022. 5/3(119). P. 6–16. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2022.265668> (видання індексовано в базі Scopus, Q3).

12. Бутко Т. В., Пархоменко Л. О., Топчий А. В. Формалізація технології функціонування сортувальної станції на основі ризик-менеджменту. *Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті*. 2022. 4. С. 28–32.

13. 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. 1. Р. 31–37. DOI: 10.18664/ikszt.v28i1.276341.

14. Пархоменко Л. О., Прохоров В. М., Калашнікова Т. Ю., Шандер О. Е. Розроблення СППР для управління процесом формування контейнерних поїздів у рамках системи інтермодальних перевезень. *Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті*. 2023. № 3. С. 29–42. DOI: 10.18664/ikszt.v28i3.290142.

15. Бутко Т. В., Пархоменко Л. О., Артемов Е. М., Лагно О. С. Методи організації вантажних залізничних перевезень на основі ризик-орієнтованих технологій. *Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті*. 2023. № 4. С. 38–45. DOI: 10.18664/ikszt.v28i4.296468.

16. Пархоменко Л. О., Прохоров В. М., Калашнікова Т. Ю., Овсянніков Д. О. Формування моделі управління пріоритетністю обробки вагонів на технічних станціях в умовах невизначеності. *Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті*. 2024. № 1. С. 45–54.

17. Пархоменко Л. О., Прохоров В. М., Калашнікова Т. Ю., Кофанов О. В. Формування моделі ризику в задачі забезпечення дотримання строку доставки вантажів в умовах невизначеності із використанням теорії нечітких множин та теорії Демпстера-Шафера. *Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті*. 2024. № 2. С. 81–90.

18. Пархоменко Л. О., Прохоров В. М. Уточнення моделі розрахунку плану формування поїздів за рахунок урахування ефекту навантаженості сортувальних станцій. *Вісник Приазовського Державного Технічного Університету. Серія: Технічні науки*. 2024. № 48. С. 193–205.

19. Пархоменко Л. О., Прохоров В. М., Калашнікова Т. Ю. Удосконалення технології управління місцевою роботою дільниці в умовах невизначеності на основі робастної оптимізації. *Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті*. 2024. № 3. С. 3–12.

Наукові праці, які додатково відображують наукові результати дисертації:

20. Панченко С. В., Бутко Т. В., Пархоменко Л. О., Прохорченко Г. О. Формування автоматизованої системи розрахунку графіку руху поїздів на сітьовому рівні. *Інновації інфраструктури транспортно-логістичних систем. Проблеми, досвід, перспективи : збірник тез конференції (11-17 квітня 2016 р. м. Трускавець)*. Сєверодонецьк, 2016. С. 137–138.

21. Пархоменко Л. О., Грицай В. О. Удосконалення технології роботи станції в частині покращення організації обслуговування пасажирів. *Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті*. 2018. № 4 (додаток). С. 80.

22. Prokhorchenko A., Parkhomenko L., Kyman A., Matsiuk V., Stepanova J. Improvement of the technology of accelerated passage of low-capacity car traffic on the basis of scheduling of grouped trains of operational purpose. *Procedia Computer Science*. 2019. Vol. 149. P. 86–94 (індексовано в базі Scopus).

23. Parkhomenko L., Viznyak R., Skurikhin D., Eiduks J. Railway-Ferry Crossings of Ukraine and Baltics as an Efficient Link of the Baltic-Black Sea Transport Corridor. *Lecture Notes in Intelligent Transportation and Infrastructure. ICTE in Transportation and Logistics 2019*, Springer, 2020. 171–179. https://doi.org/10.1007/978-3-030-39688-6_23. (індексовано в базі Scopus).

24. Lavrukhin L., Kravets A., Parkhomenko L., Kulova D., Panchenko A., Ivaskovska N. Improving the quality of railway operation to extend the services of transportation of cargo of small volume. *Lecture Notes in Intelligent Transportation and*

Infrastructure. ICTE in Transportation and Logistics 2019, Springer, 2020. 35–43. [https://DOI 10.1007/978-3-030-39688-6_6](https://doi.org/10.1007/978-3-030-39688-6_6) (індексовано в базі Scopus).

25. Пархоменко Л. О., Чехунов Д. М. Дослідження показників вантажних перевезень в контексті обробки вагонопотоків із небезпечними вантажами. *Матеріали Міжнародної науково-практичної Internet-конференції «Моделювання та інформаційні технології в науці, техніці та освіті» (21–22 листопада 2018 р.)*. Харків, 2018. С. 171–177. DOI: 10.1016/j.procs.2019.01.111.

26. Parkhomenko L., Khodakivskyi O., Khodakivska Y., Kuzmenko O., Pakalnis A. Improvement of the organization of operation of the Ukrainian railway transport on the basis of the idea of unification of the automated freight and passenger transportation control system. «Transport Means» – Proceedings of the International Conference (October 2019). Kaunas University of Technology. 2019. P. 859–861 (індексовано в базі Scopus).

27. Бутько Т. В., Колісник А. В., Пархоменко Л. О. Удосконалення організації взаємодії залізничних вузлів та портів при контейнерних перевезеннях. *Тези доповідей 1-ї Міжнародної науково-технічної конференції «Інтелектуальні транспортні технології» (Трускавець-Харків, 24-30 січня 2020 р.)*. Харків: УкрДУЗТ, 2020. С. 13.

28. Пархоменко Л. О., Калашнікова Т. Ю., Прохоров В. М. Підвищення інтегрованості залізничної транспортної системи України при здійсненні інтермодальних контейнерних перевезень на основі технології Metrocargo™. *The 4th International scientific and practical conference «Innovations and prospects of world science» (December 1-3, 2021) Perfect Publishing, Vancouver, Canada*. 2021. С. 312–317.

29. Бутько Т. В., Прохоров В. М., Пархоменко Л. О., Прокопов А. О. Перспективи розвитку вантажних інтермодальних перевезень в Україні з точки зору побудови нових залізничних шляхів з Європейською шириною колії. *Тези доповідей 2-ї Міжнародної міжнародної науково-технічної конференції «Інтелектуальні транспортні технології», ІТТ. 2021 (Харків, 27–29 квітня 2021 р.)*. Харків, 2021. С. 312–317.

30. Пархоменко Л. О., Мансурова З. Удосконалення технології роботи залізничного і морського транспорту на засадах логістики. *Тези доповідей 3-ї Міжнародної науково-технічної конференції «Інтелектуальні транспортні технології», ІТТ. 2022. (Харків, 22–23 листопада 2022 р.).* Харків, 2022. С. 312–317.

31. Пархоменко Л. О., Коваль В. В. Удосконалення технологічної роботи приміського залізничного транспорту на основі взаємодії з міським транспортом. *Тези доповідей 3-ї Міжнародної науково-технічної конференції «Інтелектуальні транспортні технології», ІТТ. 2022 (Харків, 22–23 листопада 2022 р.).* Харків, 2022. С. 56–57.

32. Пархоменко Л. О., Маслов М. К. Удосконалення роботи прикордонної сортувальної станції при перевезенні небезпечних. *Тези доповідей 3-ї Міжнародної науково-технічної конференції «Інтелектуальні транспортні технології», ІТТ. 2022 (Харків, 22–23 листопада 2022 р.).* Харків, 2022. С. 57–58.

33. Пархоменко Л. О., Збукарь Д. В., Головка К. Ю., Рябков Б. Д. Удосконалення технології міжнародних залізничних перевезень на основі сучасних технічних засобів. *Тези доповідей 3-ї Міжнародної науково-технічної конференції «Інтелектуальні транспортні технології», ІТТ. 2022 (Харків, 22–23 листопада 2022 р.).* Харків, 2022. С. 54–56.

34. Твердохліб Ю., Шатунов Д., Пархоменко Л. Організація роботи сортувальної станції в умовах потенційних ризиків та перевезення небезпечних вантажів. *Тези доповідей 4-ї Міжнародної науково-технічної конференції «Інтелектуальні транспортні технології», ІТТ. 2023 (Харків, 27–28 листопада 2023 р.).* Харків, 2023. С. 64–65.

35. Кірік О., Глибокий Ю., Пархоменко Л. Організація пасажирського руху в міжнародному сполученні. *Тези доповідей 4-ї Міжнародної науково-технічної конференції «Інтелектуальні транспортні технології», ІТТ. 2023 (Харків, 27–28 листопада 2023 р.).* Харків, 2023. С. 44–45.

36. Кудзієв М., Овсянніков Д., Пархоменко Л. Удосконалення технології взаємодії залізничного транспорту з морським портом. *Тези доповідей 4-ї*

Міжнародної науково-технічної конференції «Інтелектуальні транспортні технології», ITT. 2023 (Харків, 27–28 листопада 2023 р.). Харків, 2023. С. 63–64.

37. Dahal K., Prokhorchenko A., Koirala R., Ahmed Sh., Parkhomenko L., Kravchenko M., Kharchenko D. Improvement of railway transportation of grain cargoes in Ukraine based on the principles of shared logistics. *Proceedings of the 4th international scientific and technical conference «Intelligent transport technologies», ITT. 2023 (Kharkiv, November 27–28 2023). Kharkiv, 2023. P. 77–79.*

38. Бутько Т. В., Пархоменко Л. О. Формування методів і моделей управління експлуатаційною роботою залізничної транспортної системи в умовах ризиків. *Матеріали двадцятої Міжнародної науково-практичної конференції «Міжнародна транспортна інфраструктура, індустріальні центри та корпоративна логістика», NTI. 2024 (Харків, 6–7 червня 2024 р.). Харків, 2024. С. 45–47.*

39. Пархоменко Л. О., Прохоров В. М., Калашнікова Т. Ю. Нечітка логіка другого типу як інструмент управління експлуатаційною роботою в умовах невизначеностей і ризиків. *Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті. 2024. № 3 (додаток). С. 39.*

40. Спосіб перевезення вантажів залізничним вагоном та його розвантаження на роторному вагоноперекидачі: пат. № 119656 Україна, МПК (2017.01). B61F 1/06 (2006.01), B60S 11/00, B65G 67/34 (2006.01), B65G 63/00, B61D 47/00. а2013 04011; заявл. 01.04.2013; опубл. 10.10.2017, Бюл. № 19. 6 с.

41. Система регулювання руху транспортних засобів: пат. № 139834 Україна, МПК G00G 1/08 (2006.01). u2019 06658; заявл. 13.06.2019; опубл. 27.01.2020, Бюл. № 2. 2 с.

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ	31
ВСТУП	32
РОЗДІЛ 1 АНАЛІЗ ТЕОРЕТИЧНИХ ПІДХОДІВ ДЛЯ ІДЕНТИФІКАЦІЇ ФАКТОРІВ НЕВИЗНАЧЕНОСТІ ТА РИЗИКУ І ОПЕРУВАННЯ НИМИ	42
1.1 Онтологія невизначеності	42
1.2 Онтологія ризику та аналіз зв'язків між концепціями ризику і невизначеності	48
1.3 Класифікації невизначеностей та ідентифікація факторів невизначеностей, що впливають на процеси управління експлуатаційною роботою залізничного транспорту	54
1.4 Класифікація ризиків у технічних системах, ідентифікація ризиків, що виникають у процесі управління експлуатаційною роботою залізничного транспорту	64
1.5 Формалізація та здійснення кількісних оцінок ризиків	67
1.6 Висновки до першого розділу	72
РОЗДІЛ 2 АНАЛІЗ ТЕНДЕНЦІЙ І ВИКЛИКІВ У НАУКОВИХ ДОСЛІДЖЕННЯХ У СФЕРІ УПРАВЛІННЯ ЕКСПЛУАТАЦІЙНОЮ РОБОТОЮ ЗАЛІЗНИЧНОГО ТРАНСПОРТУ В КОНТЕКСТІ ОПЕРУВАННЯ НЕВИЗНАЧЕНОСТЯМИ ТА РИЗИКАМИ	77
2.1 Актуальність наукових досліджень, спрямованих на вирішення проблем, пов'язаних із невизначеностями та ризиками у сфері управління залізничними транспортними системами	77
2.2 Аналіз наукових досліджень, спрямованих на зменшення негативного впливу факторів невизначеності та ризику у сфері організації перевезень на магістральних лініях залізничної мережі	78
2.3 Аналіз наукових публікацій, спрямованих на нівелювання впливу невизначеності та ризику у сфері управління експлуатаційною роботою технічних залізничних станцій	81

2.4	Аналіз науково-практичних розробок, спрямованих на ефективну протидію впливу факторів невизначеності та ризику у сфері організації процесу пасажирських залізничних перевезень	83
2.5	Аналіз наукових досліджень, спрямованих на приборкання негативного впливу факторів невизначеності та ризику у сфері інтермодальних вантажних перевезень із залученням залізничного транспорту	87
2.6	Аналіз наукових досліджень, присвячених нівелюванню впливу факторів невизначеності та ризику, пов'язаних зі структурними змінами і стратегічними або проєктними рішеннями, які безпосередньо впливають на експлуатаційну роботу	93
2.7	Аналіз наукових статей, присвячених вирішенню проблем контролю за факторами невизначеності та ризику, що виникають у логістичних системах, які використовують залізничний транспорт	95
2.8	Аналіз наукових розробок, присвячених проблемам зменшення рівня ризику, пов'язаного з перевезеннями небезпечних вантажів залізничним транспортом	96
2.9	Науковий внесок і перспективи подальших досліджень	97
2.10	Висновки до другого розділу	98
РОЗДІЛ 3 УМОВИ ЗДІЙСНЕННЯ ЗАЛІЗНИЧНИХ ПЕРЕВЕЗЕНЬ ЗА РЕЗУЛЬТАТАМИ СТАТИСТИЧНОГО АНАЛІЗУ ПОКАЗНИКІВ У КОНТЕКСТІ УПРАВЛІННЯ ЕКСПЛУАТАЦІЙНОЮ РОБОТОЮ		103
3.1	Аналіз показників роботи залізничного транспорту України	103
3.2	Аналіз варіативності параметрів експлуатаційної роботи на прикладі даних добового вагонопотоку певного призначення сортувальної станції	111
3.3	Аналіз стохастичних властивостей параметрів експлуатаційної роботи на прикладі даних вхідного вагонопотоку сортувальної станції, поданого як двозмінний часовий ряд	118
3.4	Висновки до третього розділу	138
РОЗДІЛ 4 ФОРМУВАННЯ ПІДХОДІВ ДЛЯ НІВЕЛЮВАННЯ ВПЛИВУ ФАКТОРІВ НЕВИЗНАЧЕНОСТІ НА ПРИКЛАДАХ КЛАСИЧНИХ ЗАДАЧ УПРАВЛІННЯ ЕКСПЛУАТАЦІЙНОЮ РОБОТОЮ		143

4.1 Неточності моделі стратегічного планування як фактори епістемічної невизначеності	143
4.2 Визначення залежності витрат вагоногодин для обробки вагонопотоків залежно від рівня завантаженості станції	147
4.3 Формування уточненої оптимізаційної математичної моделі розрахунку ПФП	158
4.4 Проведення моделювання із застосуванням уточненої оптимізаційної моделі розрахунку ПФП	162
4.5 Удосконалення технології управління місцевою роботою дільниці в умовах невизначеності	169
4.6 Формування математичної моделі	177
4.7 Проведення моделювання та аналіз отриманих результатів	183
4.8 Висновки до четвертого розділу	190
РОЗДІЛ 5 ФОРМУВАННЯ ТЕХНОЛОГІЇ РИЗИК-МЕНЕДЖМЕНТУ ДЛЯ ВИРШЕННЯ ПРОБЛЕМИ ЗАБЕЗБЕЧЕННЯ ДОТРИМАННЯ СТРОКУ ДОСТАВЛЕННЯ ВАНТАЖІВ У КОНТЕКСТІ ОПЕРАТИВНОГО УПРАВЛІННЯ ЗАЛІЗНИЧНИМИ ТЕХНІЧНИМИ СТАНЦІЯМИ В УМОВАХ НЕВИЗНАЧЕНОСТІ	194
5.1 Аналіз проблеми несвоєчасного доставлення вантажів залізничним транспортом в Україні	194
5.2 Аналіз проблеми недотримання строку доставлення в контексті технологічного процесу роботи технічних станцій	198
5.3 Формування нейромережевої моделі визначення пріоритету обробки вагонів на технічних станціях в умовах невизначеності	200
5.4 Навчання моделі, отримання результатів і їх аналіз	206
5.5 Вимоги до прозорості та варіативності рішень СППР	213
5.6 Формування підходів для підвищення точності моделей оперативного планування роботи технічних станцій в умовах невизначеності шляхом одночасного врахування інформації з різних джерел на основі ТДШ	215

5.7	Методологія застосування концепції щільності ризику для підвищення точності моделі оцінки нелінійних наслідків затримки вагона на основі інтегрального підходу	224
5.8	Формалізація процесу оперативного планування роботи технічної станції в умовах невизначеності із використанням методу оцінювання можливих наслідків недотримання строків доставлення вантажів на основі запропонованої ризик-моделі	228
5.9	Моделювання процесу оперативного планування роботи технічної станції в умовах невизначеності	235
5.10	Висновки до п'ятого розділу	244
	РОЗДІЛ 6 ПЛАНУВАННЯ ПАСАЖИРСЬКИХ ІНТЕРМОДАЛЬНИХ ПЕРЕВЕЗЕНЬ В УМОВАХ НЕВИЗНАЧЕНОСТІ ІЗ ЗАСТОСУВАННЯМ НЕЙРОМЕРЕЖЕВОЇ ПРОГНОЗНОЇ МОДЕЛІ	248
6.1	Вплив нових транспортних технологій на розвиток туристичної індустрії в Україні	248
6.2	Аналіз факторів попиту на залізничні пасажирські перевезення в контексті туризму	249
6.3	Формування моделі корисності поїздки для пасажирів	254
6.4	Формування моделі розрахунку схеми курсування швидкісних поїздів на напрямку в умовах туристичних пасажиропотоків	262
6.5	Формування моделі прогнозування пасажиропотоків	266
6.6	Оптимізація моделі	273
6.7	Висновки до шостого розділу	276
	РОЗДІЛ 7 УДОСКОНАЛЕННЯ ТЕХНОЛОГІЇ ПРОСУВАННЯ КОНТЕЙНЕРНИХ ПОЇЗДІВ НА НАПРЯМКУ У СКЛАДІ СИСТЕМИ ІНТЕРМОДАЛЬНИХ ПЕРЕВЕЗЕНЬ В УМОВАХ НЕВИЗНАЧЕНОСТІ	280
7.1	Аналіз взаємодії залізничного і морського транспорту в контексті інтермодальних контейнерних перевезень	280
7.2	Дослідження природи та параметрів контейнеропотоків до залізничних термінальних станцій у процесі формування контейнерних поїздів	286

7.3 Розроблення моделі управління процесом формування контейнерних поїздів у рамках системи міжнародних інтермодальних перевезень	297
7.4 Проведення моделювання та аналіз результатів	315
7.5 Висновки до сьомого розділу	320
РОЗДІЛ 8 ФОРМУВАННЯ ТЕХНОЛОГІЇ ШВИДКОГО ДОСТАВЛЕННЯ КОНТЕЙНЕРІВ У РАМКАХ СИСТЕМИ ІНТЕРМОДАЛЬНИХ ПЕРЕВЕЗЕНЬ В УМОВАХ НЕВИЗНАЧЕНОСТІ	324
8.1 Аналіз конкуренції між видами транспорту на ринку транспортних послуг на коротких і середніх дистанціях у контексті інтермодальних міжнародних контейнерних перевезень	324
8.2 Аналіз проблем, пов'язаних із трансфером контейнеропотоків між морським і сухопутними видами транспорту	329
8.3 Вибір технічних засобів для вирішення проблем трансферу та сухопутного доставлення контейнерів	333
8.4 Формування технології швидкого доставлення вантажів в рамках системи інтермодальних контейнерних перевезень на основі нових сучасних технічних засобів і підходів для взаємодії між залізничним і морським транспортом	338
8.5 Формування моделі управління швидкими залізничними контейнерними перевезеннями в умовах невизначеності на основі робастної оптимізації	340
8.6 Моделювання процесу побудови оперативного плану роботи системи швидкого залізничного доставлення контейнерів та аналіз результатів	351
8.7 Економічне обґрунтування впровадження розробленої технології швидких залізничних контейнерних перевезень	359
8.8 Висновки до восьмого розділу	366
ВИСНОВКИ	370
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	376
ДОДАТОК А АКТИ ВПРОВАДЖЕННЯ	400
ДОДАТОК В ВІЗУАЛІЗАЦІЯ ПОКАЗНИКІВ І ПАРАМЕТРІВ ЕКСПЛУАТАЦІЙНОЇ РОБОТИ	414

ДОДАТОК Г РІЧНА ДИНАМІКА ВАНТАЖООБІГУ ЗАЛІЗНИЧНОГО ТРАНСПОРТУ	415
ДОДАТОК Д РЕЗУЛЬТАТИ МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСУ ПОБУДОВИ ОПЕРАТИВНОГО ПЛАНУ РОБОТИ ТС	418
ДОДАТОК Е ДАНІ ДИНАМІКИ ДОБОВОГО ВАГОНОПОТОКУ ОКРЕМОГО НАПРЯМКУ СОРТУВАЛЬНОЇ СТАНЦІЇ	421
ДОДАТОК Ж ДАНІ МОМЕНТІВ ЧАСУ НАДХОДЖЕННЯ КОНТЕЙНЕРІВ ДО ТЕРМІНАЛЬНОЇ СТАНЦІЇ	423

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ

АТ – акціонерне товариство

АСК УЗ Є – єдина автоматизована система керування залізничними перевезеннями на мережі АТ «Укрзалізниця»

АСК ВП УЗ Є – єдина автоматизована система керування вантажними залізничними перевезеннями на мережі АТ «Укрзалізниця»

АСК ПП УЗ Є – єдина автоматизована система керування пасажирськими залізничними перевезеннями на мережі АТ «Укрзалізниця»

ГА – генетичний алгоритм

ГРП – графік руху поїздів

ДП – державне підприємство

ЄС – Європейський Союз

НМ – нейронна мережа

ЗТС – залізнична транспортна система

ПФП – план формування поїздів

РФ – регіональна філія

СППР – система підтримки прийняття рішень

СП – сортувальний парк

СС – залізнична сортувальна станція

ТДШ – теорія Демпстера-Шафера

ТІ – теорія імовірностей

ТО – технічне обслуговування

ТС – залізнична технічна станція

УкрДАЗТ – Українська державна академія залізничного транспорту

УкрДУЗТ – Український державний університет залізничного транспорту

ВСТУП

Актуальність теми. Залізничний транспорт відіграє головну роль у забезпеченні ефективних логістичних рішень як на національному, так і міжнародному рівнях. Проте для сучасних умов функціонування залізничних систем характерний високий рівень невизначеностей і ризиків, що суттєво впливає на стабільність і ефективність їхньої експлуатації.

Ланка управління залізничного транспорту традиційно стикається з численними викликами, що виникають внаслідок непередбачуваності зовнішніх і внутрішніх факторів, викликаних окремими подіями і такими, що завжди присутні і є наслідком стохастичної природи перевізного процесу. Однак у сучасних умовах рівень і чисельність цих викликів стрімко зростають внаслідок цілої низки причин. Такі фактори включають варіативність попиту на перевезення, коливання параметрів транспортних потоків, технічні і оперативні збої, кліматичні зміни, бойові дії та інші непередбачувані обставини тощо.

Ці виклики ускладнюють ефективне планування і управління експлуатаційною діяльністю, що призводить до підвищення ризиків і витрат. В умовах зростаючих вимог до надійності та ефективності транспортних систем існує необхідність у розробленні нових теоретичних і практичних підходів, які б дали змогу зменшити вплив невизначеностей і ризиків на роботу залізничного транспорту.

Невизначеності в управлінні залізничними системами також часто пов'язані з недостатністю інформації, її неповнотою або зашумленістю, неефективними методами її обробки та прогнозування, людським фактором ухвалення рішень тощо. Це спричиняє додатковий рівень складності в забезпеченні надійного та ефективного функціонування залізничної транспортної системи. У зв'язку з цим сучасні підходи для управління невизначеностями, такі як байєсівські моделі, нечітка логіка, м'які обчислення, НМ та інші інноваційні методи, стають усе більш важливими і необхідними.

Сьогодні вже розроблено багато нових математичних теорій, моделей і методів, які, хоча й не можуть повністю вирішити проблему невизначеностей, теоретично здатні значно покращити управлінські механізми оперування цими факторами та протидії їхньому негативному впливу. Однак застосування цих новітніх методів і математичних апаратів до теорії і практики управління залізничними системами є окремою проблемою, вирішення якої, з одного боку, передбачає вироблення загальних підходів, з іншого боку, потребує коректного враховування технологічних обмежень і специфіки управління окремими складовими транспортного процесу.

Зважаючи на вищевикладене, тема дисертації є актуальною, оскільки спрямована на розроблення нових наукових основ управління експлуатаційною роботою залізничної системи в умовах невизначеностей і ризиків. Це дасть змогу підвищити ефективність перевезень, зменшити експлуатаційні витрати і забезпечити надійне доставлення вантажів, що є важливим для економічного розвитку та конкурентоспроможності залізничного транспорту.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Дисертаційна робота виконувалася відповідно до Національної транспортної стратегії України на період до 2030 року, затвердженої розпорядженням Кабінету Міністрів України (КМУ) від 07.04.2021 р. № 321-р, Регламенту (ЄС) 913/2010 Європейського Парламенту та Ради від 22 вересня 2010 року стосовно Європейської залізничної мережі для конкурентних вантажних перевезень, а також науково-дослідних робіт за темами: "Integrated rail freight optimization in Ukraine: Railwaysleepers, rolling stock and logistics" (ДР № 0123U102700), "Дослідження та розробка правил рівноправного доступу до інфраструктури залізничного транспорту загального користування" (ДР №0117U005413), у яких авторка брала участь у якості виконавця.

Мета і задачі дослідження. Метою роботи є розвиток теоретичних положень, методологічних основ і практичних рішень щодо підвищення якості і надійності експлуатації залізничної транспортної системи в умовах впливу факторів невизначеності і ризику шляхом підвищення ефективності існуючих та впровадження нових управлінських технологій.

Для досягнення вказаної мети в роботі були поставлені такі основні завдання наукових досліджень:

- провести ідентифікацію факторів і джерел невизначеності в контексті управління експлуатаційною роботою залізничного транспорту та аналіз існуючих підходів і методів оперування різними видами невизначеностей;
- провести аналіз поточного стану та можливості розвитку технологій оперування факторами невизначеності та ризик-менеджменту на основі огляду наукових джерел;
- провести аналіз техніко-експлуатаційних показників залізничних перевезень в Україні;
- провести ідентифікацію ознак невизначеності у зразках масивів даних, що використовуються для вироблення і прийняття рішень у сфері управління експлуатаційною роботою залізничної системи;
- розробити методи і технологію управління експлуатаційною роботою у галузі вантажних залізничних перевезень в умовах впливу факторів невизначеності та ризику;
- розробити методи і технологію управління експлуатаційною роботою у галузі пасажирських залізничних перевезень в умовах впливу факторів невизначеності та ризику;
- розробити методи і технології управління експлуатаційною роботою у сфері контейнерних перевезень як перспективної галузі транспортної системи України в умовах впливу факторів невизначеності та ризику;
- провести техніко-економічне обґрунтування запропонованих рішень на прикладі впровадження розробленої інтелектуальної транспортної технології.

Об'єкт дослідження – процес управління експлуатаційною роботою залізничної транспортної системи в умовах невизначеностей і ризиків.

Предмет дослідження – ризик-орієнтовані технології та технології управління експлуатаційною роботою залізничної транспортної системи, які реалізують підходи щодо оперування невизначеністю.

Методи дослідження. При виконанні дисертаційної роботи використовувались методи теорії управління експлуатаційною роботою на залізничному транспорті, теорії систем та системного аналізу, теорії імовірностей, теорії Демпстера-Шафера, теорії випадкових процесів, теорії точкових процесів, математичної статистики, теорії ризиків, теорії надійності, теорії масового обслуговування, методи дослідження операцій, математичного моделювання, теорії прийняття рішень, математичного програмування, наукового прогнозування, теорії нейронних мереж, апарату теорії графів, класичні методи оптимізації, методи дискретної, комбінаторної, векторної та робастної оптимізації, методи теорії нечітких множин та нечіткої логіки, м'яких та еволюційних обчислень.

Наукова новизна одержаних результатів. Розвинуто наукові основи управління експлуатаційною роботою залізничної транспортної системи, що забезпечують необхідний рівень надійності і ефективності її функціонування в умовах зростаючого рівня складності і чисельності викликів, пов'язаних з негативним впливом факторів невизначеності та ризику.

Вперше:

- розроблена технологія управління ризиками, яка спрямована на забезпечення дотримання термінів доставки вантажів в умовах невизначеностей та ризиків; запропонована технологія включає нові підходи до оптимізації роботи технічних станцій та впровадження сучасних методів управління, що дозволяють покращити ефективність технологічного процесу;

- з урахуванням технологічного фактору ризику (збільшення строків проведення сукупності транспортно-логістичних технологічних операцій) запропоновано і обґрунтовано метод управління процесом формування і просування контейнерних поїздів маршрутів в межах транспортно-логістичного ланцюга, у тому числі при кроскордонних перевезеннях, на основі оптимізаційної моделі стохастичного програмування, у якості критерія оптимізації якої виступає сума питомих експлуатаційних витрат по кожному елементу транспортно-логістичного ланцюга, а система обмежень враховує технічні і технологічні можливості залізничної інфраструктури і тягового рухомого складу;

– з урахуванням фактору невизначеності вихідної інформації (варіативність тривалості транспортних і вантажних операцій, "вікон" доступності вантажних фронтів) розроблено теоретичні основи технології швидкого залізничного сполучення між портами та підприємствами-вантажотримувачами і вантажовідправниками в ході здійснення контейнерних перевезень на основі впровадження інноваційних технічних засобів, таких як модульні контейнерні поїзди типу CargoSprinter та автоматичні вантажні системи MetroCargo, а також розробленої робастної моделі оперативного планування роботи поїздів;

– в ході формування зазначеної вище технології був запропонований універсальний підхід для вирішення задач робастної оптимізації, на основі якого розроблений оригінальний метод оптимізації робастних моделей на базі використання сучасного математичного апарату генетичних алгоритмів (ГА). Даний метод на новому якісному рівні надає можливість постановки і вирішення широкого класу задач управління експлуатаційною роботою залізничного транспорту завдяки наданню можливості оперувати даними, які характеризуються невизначеністю не лише стохастичного та статистичного, але й епістемічного типу.

Дістали подальшого розвитку:

– математичні моделі, які інтегрують сучасні методи обробки даних, такі як нечітка логіка, м'які обчислення та нейронні мережі, для покращення точності прогнозування та прийняття рішень в умовах невизначеності.

– комплексний підхід до управління залізничними системами, що дозволяє інтегрувати математичні моделі, оптимізаційні процедури та сучасні технології управління, забезпечуючи системний підхід до вирішення проблем невизначеності та ризиків в експлуатаційній діяльності;

– методи прогнозування часових рядів за рахунок запропонованого методу прогнозування пасажиропотоків із застосуванням нейронних мереж на основі архітектури генеративно-змагального типу.

Удосконалено:

– підходи до інтеграції сучасних технологій в управління залізничними перевезеннями, що дозволяють ефективно впроваджувати технології використання

інноваційних технічних рішень, таких як CargoSprinter і MetroCargo, у традиційні системи управління залізничним транспортом.

Практичне значення одержаних результатів. Запропоновано практичні рішення, спрямовані на підвищення ефективності управління експлуатаційною роботою залізничного транспорту в умовах дії факторів невизначеності та ризику, зокрема зменшення витрат на організацію перевезень та підвищення їх надійності. Розроблено підходи, математичні моделі та технології управління, які навіть в умовах неповних або суперечливих даних та можливості виникнення небажаних подій дозволяють, оптимізуючи використання ресурсів, забезпечити належний рівень ефективності перевізного процесу одночасно з високою якістю транспортних послуг. Отримані результати досліджень навіть за умов тривалого або постійного впливу негативних факторів невизначеності та ризику дозволяють комплексно підвищити ефективність функціонування залізничної системи: оптимізувати використання елементів інфраструктури та технічних засобів, зокрема технічних станцій, а також рухомого складу (локомотиви, вагони, контейнери) шляхом раціоналізації процесів накопичення контейнерних партій, формування та переформування поїздів, їх просування залізничною мережею, оптимізувати процеси місцевої роботи та процеси взаємодії залізничних підприємств з іншими видами транспорту, підвищити привабливість та конкурентоспроможність пасажирських перевезень.

Результати проведених досліджень рекомендовано застосовувати в оперативних та планових підрозділах залізниці у якості основи для побудови систем підтримки прийняття рішень (СППР) з подальшою їх інтеграцією до складу системи АСК УЗ Є у вигляді типових задач управління в умовах впливу факторів невизначеності і ризику, які є невід'ємними складовими перевізного процесу.

Деякі результати досліджень, такі як спосіб перевезення вантажів залізничним вагоном, а також система регулювання руху транспортних засобів, було оформлено у вигляді патентів (патенти України на корисну модель: 119656, 139834).

Практичне використання результатів роботи підтверджено відповідними актами впровадження на регіональній філії "Південна залізниця" у складі АТ "Українська залізниця" та у компанії-оператора ТОВ "Бруклін-Київ" (додаток А)..

Отримані в дисертаційній роботі результати також використовуються в навчальному процесі кафедри управління експлуатаційною роботою УкрДУЗТ при підготовці здобувачів вищої освіти (бакалаврів і магістрів) за спеціальністю 275 – Транспортні технології (на залізничному транспорті). (на залізничному транспорті) (додаток А).

Особистий внесок здобувача. Усі результати дисертаційної роботи, які виносяться на захист, отримані особисто здобувачем або за його безпосередньої участі. У наукових працях, опублікованих зі співавторами, особистий внесок полягає у такому: у [1] проведено аналіз отриманих результатів розрахунків, пов'язаних з визначенням пропускнуої спроможності залізничної дільниці, у [2] сформовано нечітку прогнозну моделі, у [3] здійснено моделювання та проведено аналіз отриманих результатів, у [4] здійснений аналіз динаміки пасажиропотоків у швидкісному залізничному сполученні, у [5] обґрунтовано створення відділу стратегічного планування з метою реалізації системи стратегічного управління пасажирськими перевезеннями, у [6] – збір та підготовка вихідних даних для проведення розрахунків, у [7] – розробка процедури для статистичного моделювання та частковий аналіз результатів моделювання, у [8] – обґрунтування використання математичного апарату теорії точкових процесів та корегування оптимізаційної математичної моделі, у [9] – ідентифікація факторів, що впливають на здійснення вибору пасажирями, розробка оптимізаційної математичної моделі планування роботи швидкісних пасажирських поїздів на напрямку, у [10] розроблено принцип кодування рішення з метою забезпечення можливості застосування математичного апарату ГА для вирішення задачі оптимізації маршрутів швидкісних пасажирських поїздів, у [11] запропоновано ідею поєднання технологій MetroCargo та CargoSprinter з метою посилення інтеграції морського і залізничного транспорту, розроблено оптимізаційну математичну модель оперативного планування контейнерних перевезень, розроблено спеціалізований

генетичний алгоритм для оптимізації робастних моделей, у [12] розроблено оптимізаційну математичну модель управління станцією, у [13] розроблено математичну модель визначення маршруту пасажирських поїздів на засадах ризик-менеджменту, у [14] розроблено оптимізаційну математичну модель управління процесом формування контейнерних поїздів на основі використання ТІ та теорії часових точкових процесів, у [15] розроблено математичну модель управління прикордонною передавальною станцією на засадах ризик-менеджменту з метою здійснення своєчасного транскордонного трансферу вантажопотоків, у [16] розроблено нейромережеву модель визначення пріоритету обробки вагонів на технічних станціях з метою забезпечення своєчасної доставки вантажів, у [17] запропоновано підхід щодо забезпечення можливості агрегації інформації з різних джерел на основі положень теорії Демстера-Шафера, розроблено нелінійну модель обчислення ризику на основі використання функції щільності ризику, у [18] проведений статистичний аналіз даних, запропоноване удосконалення моделі розрахунку ПФП у вигляді функції залежності середньої тривалості переробки вагона від рівня завантаженості станції, проведений аналіз результатів розрахунків, у [19] на основі реалізації підходів робастної оптимізації розроблено математичну модель управління роботою збірних поїздів на дільниці, здійснено аналіз результатів розрахунків, у [20] здійснено аналіз документів, регламентуючих взаємодію України і ЄС у сфері залізничного транспорту, у [21] визначення вимог до параметрів руху додаткових пасажирських поїздів, у [22] розроблено процедуру оптимізації цільової функції, у [23] здійснено історичний аналіз передумов виникнення поромних сполучень на Балтиці та Чорному морі, виконано аналіз факторів ефективної взаємодії залізничного і водного видів транспорту в контексті функціонування міжнародних логістичних систем, у [24] здійснено аналіз схем обслуговування залізничної клієнтури, у [25] – статистична обробка даних щодо залізничних перевезень небезпечних вантажів, у [26] – аналіз наслідків варіантів інтеграції систем управління залізничними підрозділами, у [27] запропоновано ідеї інтеграції морських портів та залізничних вузлів з метою опанування зростаючих міжнародних вантажопотоків, у [28] запропоновано і досліджено ідею розвитку

мережі залізничних контейнерних перевезень на основі застосування технології MetroCargo, у [29] обґрунтовано ідею прокладення євроколії територією України з метою забезпечення функціонування балтійсько–чорноморського транспортного коридору, у [30] запропоновано та обґрунтовано ідею створення єдиного інформаційного простору для підвищення ефективності взаємодії залізничного і морського транспорту, у [31] – аналіз шляхів підвищення ефективності залізничного транспорту, у [32] – аналіз шляхів розвитку технологій обробки вагонів з небезпечними вантажами на сортувальних станціях, у [33] – обґрунтування впровадження терміналів MetroCargo в Україні, у [34] – аналіз джерел ризику при здійсненні управління роботою станції, у [35] – аналіз аспектів оптимізації роботи залізничного пасажирського транспорту, у [36] – аналіз аспектів функціонування логістичних ланцюгів із використанням залізничного і водного транспорту, у [37] – аналіз можливості застосування підходів теорії ігор для оптимізації технології перевезень зернових вантажів за допомогою залізничного транспорту, у [38] – ідентифікація факторів ризику при забезпеченні функціонування логістичного ланцюга, у [39] – аналіз можливості застосування математичного апарату нечіткої логіки другого типу для вирішення задач управління експлуатаційною роботою, у [40] – розробка елементів транспортної технології, у [41] – розробка елементів технології роботи системи регулювання руху транспортних засобів.

Дослідження, висвітлені в усіх наукових працях, проведено в УкрДУЗТ.

Апробація результатів дисертації. Апробація результатів дисертації. Основні матеріали результатів дисертаційної роботи доповідалися, обговорювалися та отримали схвалення на таких наукових конференціях: Міжнародна науково-практична конференція "Інновації інфраструктури транспортно-логістичних систем. Проблеми, досвід, перспективи", 2016 р. (Україна, м. Трускавець); 31-а міжнародна науково-практична конференція "Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті". 2018, (Україна, м. Харків); Міжнародна науково-практична Internet-конференція "Моделювання та інформаційні технології в науці, техніці та освіті", 2018, (Україна, м. Харків); International Conference "Transport Means", 2019, (Литва, м. Каунас); 1-а Міжнародна науково-технічна конференція «Інтелектуальні

транспортні технології», 2020, (Україна, м. Трускавець – м. Харків); The 4th International scientific and practical conference “Innovations and prospects of world science”, 2021, (Канада, м. Ванкувер); 2-а міжнародна науково-технічна конференція "Інтелектуальні транспортні технології" (ІТТ). 2021, (Україна, м. Харків); 3-я міжнародна науково-технічна конференція "Інтелектуальні транспортні технології" (ІТТ). 2022, (Україна, м. Харків); 4-а міжнародна науково-технічна конференція "Інтелектуальні транспортні технології" (ІТТ). 2023, (Україна, м. Харків); 20-а науково-практична міжнародна конференція "Міжнародна транспортна інфраструктура, індустриальні центри та корпоративна логістика" (НТІ). 2024, (Україна, м. Харків); 37-а міжнародна науково-практична конференція "Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті". 2024, (Україна, м. Харків).

У повному обсязі дисертаційна робота доповідалася на розширеному семінарі кафедри управління експлуатаційною роботою Українського державного університету залізничного транспорту.

Публікації. Основні положення дисертаційної роботи і результати досліджень опубліковані в 41 науковій праці: 19 основних праць, з яких 19 статей у наукових фахових виданнях України; в тому числі 5 наукових статей у виданнях, що індексуються наукометричними базами даних SCOPUS та/або WoS (з них 5 – третього квартилю (Q3)), та 22 працях, які додатково відображають наукові результати досліджень в тому числі 4 – в закордонних наукових виданнях, індексованих наукометричними базами даних SCOPUS та/або WoS, 2 патенти України на корисну модель.

Структура та обсяг дисертації. Дисертація має вступ, вісім розділів, висновки, список використаних джерел з 228 найменувань і сім додатків. Повний обсяг дисертації складає 423 сторінки, у тому числі 328 сторінок основного тексту, 24 таблиці, 79 рисунків, 24 сторінки додатків.

РОЗДІЛ 1

АНАЛІЗ ТЕОРЕТИЧНИХ ПІДХОДІВ ДЛЯ ІДЕНТИФІКАЦІЇ ФАКТОРІВ НЕВИЗНАЧЕНОСТІ ТА РИЗИКУ І ОПЕРУВАННЯ НИМИ

1.1 Онтологія невизначеності

Поняття невизначеності існує вже протягом багатьох століть і виникало відповідно до розвитку філософських, наукових і математичних думок. У давнину люди відчували невизначеність у своєму розумінні природи та світу навколо себе, але перші систематичні спроби формалізації невизначеності з'явилися в середньовіччі. Протягом історії, зокрема в роботах Арістотеля, Платона, Декарта, Ньютона та інших великих філософів і вчених, були зроблені спроби розуміти природу невизначеності та її вплив на наше розуміння світу.

Отже, це поняття пов'язане не лише з певними теоріями, а насамперед із історичними постатями вчених, завдяки яким воно було введене і трансформувалося протягом століть.

Видатні постаті в історії розуміння невизначеності:

Арістотель (384-322 до н. е.) - грецький філософ, зробив важливий внесок у розвиток логіки та метафізики, що мало великий вплив на наше розуміння невизначеності.

Галілео Галілей (1564-1642) - італійський учений, зробив значний внесок у розвиток наукового методу та математики. Його відкриття та дослідження в галузі фізики викликали переосмислення багатьох аспектів нашого розуміння природи та невизначеності.

Блез Паскаль (1623-1662) - французький математик і філософ, відомий своїми роботами в галузі теорії ймовірностей, що має пряме відношення до розуміння невизначеності.

П'єр-Сімон Лаплас (1749-1827) - французький математик та астроном, зробив значний внесок у розвиток теорії ймовірностей і статистики, що стало важливим для розуміння невизначеності.

Карл Фрідріх Гаусс (1777-1855) - німецький математик, зробив великий внесок у різні галузі математики, включаючи теорію ймовірностей і статистику.

Джон фон Нейман (1903-1957) - угорський математик, зробив великий внесок у багато галузей науки, включаючи теорію ігор, квантову механіку та комп'ютерні науки. Він також розробив теорію оптимальних рішень в умовах невизначеності.

Джордж Бокс (1919-2013) - британський статистик, зробив вагомий внесок у розвиток експериментального дизайну та методів статистичного моделювання. Його роботи мали великий вплив на практичне застосування теорії невизначеності в різних галузях.

Клод Шеннон (1916-2001) - американський математик та інженер, відомий своїми роботами у теорії інформації та теорії кодування. Він допоміг розвинути математичні інструменти для аналізу невизначеності та передавання інформації в умовах шуму і втрати даних.

Френсіс Галтон (1822-1911) - англійський учений, відомий своїми роботами в галузі статистики, психології та генетики, зробив важливий внесок у розвиток статистичних методів, використовуваних для аналізу даних із невизначеністю.

Іоганн Кеплер (1571-1630) - німецький математик, астроном і філософ, який вперше сформулював закони руху планет. Його роботи в галузі астрономії потребували розвитку методів обробки даних із невизначеністю.

Вернер Гейзенберг (1901-1976) - німецький фізик, лауреат Нобелівської премії, відомий своєю роботою в галузі квантової механіки та принципу невизначеності, який стверджує, що існує фундаментальне обмеження точності, з якою можна виміряти одночасно певні пари фізичних величин.

Джордж Берклі (1685-1753) - англійський філософ і математик, відомий своїми роботами в галузі теорії пізнання та метафізики. Його ідеї про природу реальності та існування невизначеності вплинули на подальший розвиток філософських концепцій.

Макс Планк (1858-1947) - німецький фізик, лауреат Нобелівської премії, який розвинув квантову теорію та вперше ввів концепцію квантування енергії, що відіграло важливу роль у розумінні невизначеності в мікросвіті.

Ісаак Ньютон (1643-1727) - англійський фізик і математик, відомий своїми законами руху та гравітації. Його роботи в галузі фізики та математики допомогли розкрити природу невизначеності в сфері класичної механіки.

Джеймс Клерк Максвелл (1831-1879) - шотландський фізик, відомий своєю роботою в галузі електромагнетизму і статистичної механіки. Він розробив теорію газів, яка мала великий вплив на розвиток концепцій невизначеності.

Джозеф Луї Лагранж (1736-1813) - французький математик і фізик, відомий своїми роботами в галузі механіки та теорії функцій, зробив важливий внесок у розвиток математичних методів для аналізу невизначеності в механіці.

Девід Гільберт (1862-1943) - німецький математик, зробив важливий внесок у розвиток теорії чисел, геометрії та математичної логіки. Його роботи в галузі формальної логіки відіграли важливу роль у розумінні невизначеності в математиці.

Джеймс Уатт (1736-1819) - шотландський винахідник та інженер, відомий своїм внеском у розвиток парової машини. Його технологічні інновації в галузі машинобудування сприяли зменшенню невизначеності в енергетичних процесах.

Руджер Бошкович (1711-1787) - хорватський математик і фізик, зробив важливий внесок у розвиток математичної аналізу та механіки. Його роботи в галузі теорії гравітації та руху планет відіграли важливу роль у розумінні невизначеності.

Томас Байєс (1701-1761) - англійський математик, відомий своїм внеском у розвиток теорії ймовірностей і статистики. Його праці засновані на теоремі, яка відома як «теорема Байєса», що стала важливою в розвитку методів статистичного виведення та ухвалення рішень в умовах невизначеності.

Джон Мейнард Кейнс (1883-1946) - англійський економіст, який вперше ввів поняття "невизначеності" в економічну теорію. Він розвинув концепцію «несприйняття ризику», що допомогло враховувати невизначеність в ухваленні економічних рішень.

Едвард Лоренц (1917-2008) - американський метеоролог, який вперше ввів поняття «бабине літо» і розробив теорію хаотичних систем. Його роботи показали, що навіть незначні початкові зміни можуть призвести до значних відхилень у майбутньому стані системи, підкреслюючи невизначеність у прогнозуванні погоди.

Френк Найт (1885-1972) - американський економіст, який розвинув концепцію «нормальна невизначеність» в економічній теорії. Його роботи в галузі економіки підкреслюють роль невизначеності в ухваленні економічних рішень і прогнозуванні ринкових умов.

Наведені імена належать видатним ученим теоретикам і практикам і становлять лише невеличку частку когорти дослідників, які на горизонті багатьох століть намагалися визначити багатогранне поняття невизначеності, формалізувати процеси і явища, з ним пов'язані, кожен у своїй галузі досліджень або впорядкувати і систематизувати знання, пов'язані з цим поняттям, які були накопичені людством і мають академічну або практичну цінність.

Саме поняття невизначеності змінювалося не лише в часі, а значно варіюється і має суттєві або навіть кардинальні відмінності залежно від галузі застосувань. Отже, розуміння невизначеності в науці і філософії виходить за межі простого визначення терміна. Величезний внесок у цю сферу зробили видатні вчені, кожен із яких намагався осмислити цей концепт у своєму власному ключі.

Вернер Гейзенберг, видатний фізик, визначав невизначеність так: «Невизначеність - це той факт, що ми ніколи не можемо точно знати стан системи в будь-який момент часу». Це визначення підкреслює фундаментальне обмеження нашої здатності точно вимірювати рух і властивості частинок на мікроскопічному рівні.

Фріц Йенсен, філософ і фізик, розглядав невизначеність так: «Невизначеність - це обмеження нашого знання про світ, яке виникає через неможливість однозначного визначення значень фізичних величин і їхніх взаємозв'язків». Це визначення означає обмеженість нашого знання та відображує нашу непевність щодо природи фізичного світу.

Карл Фрідріх Гаусс, математик і астроном, визначав невизначеність так: «Невизначеність - це властивість, яка характеризує нашу неспроможність передбачити точний результат події чи вимірювання через випадковість або обмеженість інформації». Це визначення підкреслює важливість випадковості та обмеженості інформації як фундаментальних аспектів невизначеності.

Річард Фейнман, видатний фізик, визначав невизначеність так: «Невизначеність - це непередбачуваний стан природи, який виникає з обмежень нашого знання та взаємодії системи з навколишнім середовищем». Це визначення відображує важливість непередбачуваності та обмеженості нашого розуміння природи.

Альберт Ейнштейн, знаменитий фізик, визначав невизначеність так: «Невизначеність - це фізичний принцип, який стверджує, що неможливо точно визначити одночасно як місце, так і швидкість руху частинки». Це визначення підкреслює фундаментальну неможливість точно виміряти певні параметри фізичних об'єктів.

Клод Шеннон, відомий математик та інженер, визначав невизначеність так: «Невизначеність - це міра незнання. Вона виникає, коли ми не можемо однозначно визначити стан або результат системи через випадковість або обмеженість інформації». Це визначення підкреслює важливість інформації та випадкових процесів у виникненні невизначеності.

Джон фон Нейман, видатний математик і фізик, визначав невизначеність так: «Невизначеність - це властивість системи, яка обмежує можливість точно передбачити її стан чи реакцію на внутрішні або зовнішні впливи через взаємодію компонентів системи». Це визначення підкреслює роль взаємодії та складності систем у виникненні невизначеності.

Норберт Віннер, відомий математик і кібернетик, визначав невизначеність так: «Невизначеність - це стан, коли ми не можемо точно передбачити майбутній стан системи через недостатність інформації про початкові умови та взаємодії компонентів системи». Це визначення підкреслює роль інформації та взаємодії у виникненні невизначеності.

Ервін Шрєдінгер, відомий фізик, визначав невизначеність так: «Невизначеність - це необхідна властивість природи, яка виражається у неможливості одночасно точно виміряти положення та імпульс частинки». Це визначення підкреслює фундаментальний принцип невизначеності у квантовій механіці.

Джордж Бокс, відомий статистик, визначав невизначеність так: «Невизначеність – це ступінь невизначеності у вимірюваннях або прогнозах, яка виникає через випадковість, неповноту даних або непевність у моделі». Це визначення підкреслює роль випадковості та неповноти інформації у виникненні невизначеності.

Усі наведені визначення відображують різні аспекти невизначеності - від квантових аспектів руху частинок до соціальних та економічних аспектів людської поведінки. Усе вищесказане дає розуміння того, що невизначеність є невід'ємною складовою нашого світу і відображує складність та обмеження нашого знання і розуміння.

Вернер Гейзенберг у контексті квантової механіки підкреслює фундаментальні обмеження нашої здатності вимірювати рух і властивості частинок, що робить невизначеність невід'ємною властивістю природи. Фріц Йенсен і Карл Фрідріх Гаусс наголошують на обмеженості нашого знання та неможливості точно передбачити результати подій через випадковість і недостатність інформації.

Томас Байєс, Джон Мейнард Кейнс, Едвард Лоренц і Норберт Віннер розширюють розуміння невизначеності, підкреслюючи її роль у складних системах, де взаємодії між елементами системи роблять точне передбачення неможливим. Джордж Бокс доповнює ці визначення, акцентуючи увагу на значенні неповноти даних і випадкових процесів.

Отже, об'єднуючи визначення, надані видатними дослідниками різних епох і сфер наукових інтересів: *невизначеність - це фундаментальна властивість системи, яка виникає з обмежень нашого знання, взаємодії компонентів системи, непередбачуваності результатів і випадковості. Вона проявляється в неможливості однозначного визначення стану чи результатів вимірювань через*

неповноту інформації, неспроможність точного прогнозування майбутніх подій і взаємозв'язку між різними елементами системи.

Невизначеність є складним і багатогранним поняттям, яке має різні визначення та аспекти залежно від галузі науки та контексту, у якому його розглядають. Від класичних наукових дисциплін до соціальних наук невизначеність визначають як обмеження нашого знання і здатності до передбачення через випадковість, обмеженість інформації та складність взаємодії між компонентами системи.

Невизначеність можна узагальнити як фундаментальну властивість будь-якої системи, яка проявляється через обмеження нашого знання та здатності до точного вимірювання і передбачення. Це поняття охоплює різні аспекти, включаючи квантову невизначеність, соціально-економічні фактори, випадковість і неповноту інформації.

Отже, невизначеність є універсальною і невід'ємною характеристикою нашого світу. Вона потребує від нас сприйняття і розуміння обмеженості нашого знання та передбачення, а також розроблення методів і підходів для ефективного управління та адаптації до невизначеності в різних контекстах.

1.2 Онтологія ризику та аналіз зв'язків між концепціями ризику і невизначеності

Поняття ризику має глибокі корені в науковій думці і охоплює різні аспекти від імовірності виникнення небажаних подій до економічних і фінансових наслідків ухвалення рішень в умовах невизначеності. Ризик, як і невизначеність, є невід'ємною складовою нашого світу, і його розуміння є головним для багатьох галузей знань. У цьому розділі ми розглянемо еволюцію поняття ризику та його визначення в науковій літературі.

Історично перші згадки про ризик з'являються в контексті морських подорожей і страхування. Перші страхові компанії використовували базові концепції ризику для оцінювання ймовірності нещасних випадків і розрахунку страхових премій. Лише з розвитком теорії ймовірностей у XVII столітті ризик почав набувати чіткішої наукової форми.

Розвиток наукової думки про ризик включає внески математиків, економістів і фінансистів, які допомогли сформулювати теоретичні основи для розуміння та управління ризиком. Ризик розглядають як невід'ємний аспект ухвалення рішень, що потребує ретельного аналізу ймовірностей і потенційних наслідків.

Отже, поняття ризику є фундаментальним для багатьох галузей знань і впродовж століть воно зазнавало значних змін і еволюції. Від перших спроб зрозуміти і виміряти ризик у давні часи до сучасних наукових теорій, які використовують складні математичні моделі, ризик залишається головним елементом в ухваленні рішень і управлінні невизначеністю.

Перші згадки про ризик з'являються в контексті морських подорожей і торгівлі в стародавні часи. Тоді ризик асоціювався з небезпеками, які могли виникнути під час подорожей або бізнесових операцій. Страхування стало однією з перших спроб формалізувати ризик. Венеціанські купці в середньовіччі використовували страхові контракти для захисту своїх вантажів від піратів і стихійних лих.

У XVII столітті розвиток теорії ймовірностей дав змогу здійснити перші наукові спроби оцінити ризик. Блез Паскаль і П'єр де Ферма заклали основи теорії ймовірностей через свої дослідження азартних ігор. П'єр-Сімон Лаплас продовжив ці дослідження, увівши концепції, які дали змогу кількісно оцінювати ймовірності подій.

Поведінкова економіка, що вивчає психологічні аспекти ухвалення рішень, також зробила свій внесок у розуміння ризику. Деніел Канеман і Амос Тверські розробили теорію перспектив, яка показала, що люди часто ухвалюють рішення в умовах ризику, відхиляючись від раціональної моделі очікуваної корисності. Вони

виявили, що люди мають схильність до уникання ризику за можливості виграшу і прийняття ризику за можливості втрати.

Розвиток сучасних технологій, таких як технології обробки великої масивів даних (англ. Big Data), штучний інтелект і машинне навчання, значно змінив підходи до аналізу і управління ризиком. Ці технології дають змогу обробляти великі обсяги даних і робити точніші прогнози, що допомагає у виявленні та управлінні ризиками в різних сферах діяльності.

Ризик є важливим аспектом у багатьох галузях науки, економіки та управління, і його формалізація допомагає краще розуміти і управляти невизначеністю, пов'язаною з різними процесами та явищами.

Видатний математик Блез Паскаль у XVII столітті розглядав ризик у контексті теорії ймовірностей і визначав його так: «Ризик - це ймовірність того, що станеться небажана подія». Паскаль підкреслював значення ймовірності в ухваленні рішень і розробив методи для оцінювання ризику на основі математичних моделей імовірності.

П'єр-Сімон Лаплас, французький математик і астроном, у своїй праці «Теорія аналітичних ймовірностей» (1812) визначав ризик так: «Ризик - це ступінь невизначеності, яку можна кількісно оцінити за допомогою ймовірностей». Лаплас зробив значний внесок у розвиток теорії ймовірностей і підкреслював, що ризик можна вимірювати і аналізувати за допомогою математичних моделей.

Видатний економіст Франк Найт у своїй праці «Ризик, невизначеність і прибуток» (1921) визначав ризик так: «Ризик - це ситуація, коли ймовірності результатів відомі». Це визначення підкреслює, що ризик пов'язаний із подіями, імовірності яких можна об'єктивно оцінити на основі наявної інформації. Для Найта головною характеристикою ризику є наявність відомих імовірностей, що відрізняє його від невизначеності.

Джон Мейнард Кейнс, видатний економіст, у своїй праці «Загальна теорія зайнятості, відсотків і грошей» (1936) визначав ризик так: «Ризик - це невизначеність щодо майбутніх подій, яка може бути оцінена через імовірнісні

очікування». Кейнс підкреслював важливість суб'єктивних очікувань і психологічних факторів в ухваленні економічних рішень за умов ризику.

Джон фон Нейман і Оскар Моргенштерн у своїй книзі «Теорія ігор та економічна поведінка» (1944) визначили ризик через концепцію очікуваної корисності: «Ризик - це ситуація, у якій раціональні агенти можуть максимізувати свою корисність, ураховуючи ймовірності різних результатів». Їхнє визначення підкреслює раціональність агентів і використання ймовірностей для ухвалення рішень, що є основою сучасної теорії ігор та ухвалення рішень в умовах невизначеності.

Поль Самуельсон, американський економіст і також лауреат Нобелівської премії, у своїй праці «Основи економічного аналізу» (1947) визначав ризик так: «Ризик - це ймовірнісний характер невизначеності, яка може бути кількісно оцінена і врахована в процесі ухвалення економічних рішень». Самуельсон підкреслював значення математичного аналізу та моделювання в розумінні та управлінні ризиком.

Клод Шеннон, фундатор теорії інформації, у своїй праці «Математична теорія комунікації» (1948) розглядав ризик у контексті інформаційних систем: «Ризик - це невизначеність щодо переданої інформації». Шеннон підкреслював, що ризик виникає через випадкові зміни в системі передавання інформації, і запропонував математичні методи для кількісного оцінювання та мінімізації цієї невизначеності.

Норберт Вінер, засновник кібернетики, у своїй праці «Кібернетика» (1948) визначав ризик так: «Ризик - це можливість небажаного результату через неконтрольовані фактори». Вінер підкреслював важливість управління і контролю над системами для зменшення ризику і покращення їхньої стійкості до зовнішніх впливів.

Гаррі Марковіц, лауреат Нобелівської премії з економіки, у своїй праці «Портфельний вибір» (1952) визначав ризик у контексті інвестицій: «Ризик - це варіативність очікуваної дохідності портфеля інвестицій». Марковіц підкреслював важливість диверсифікації активів для зменшення ризику і вказував на те, що ризик можна кількісно оцінювати через статистичні показники варіативності, такі як стандартне відхилення.

Кеннет Ерроу, лауреат Нобелівської премії з економіки, у своїх роботах з теорії економічної рівноваги визначав ризик так: «Ризик - це невизначеність щодо економічних результатів, яка впливає на ухвалення рішень і може бути частково зменшена за допомогою страхування та диверсифікації». Ерроу підкреслював роль страхових ринків і диверсифікації активів у зменшенні економічних ризиків.

Франк Найт зазначав, що ризик має місце тоді, коли ймовірності результатів відомі, підкреслюючи різницю між ризиком і невизначеністю. Джон фон Нейман і Оскар Моргенштерн акцентували увагу на раціональності агентів і використанні ймовірностей для ухвалення рішень. Гаррі Марковіц розглядав ризик як варіативність дохідності інвестиційного портфеля, що можна кількісно оцінити. Клод Шеннон пов'язував ризик із невизначеністю в інформаційних системах, тоді як Норберт Вінер визначав ризик через можливість небажаних результатів через неконтрольовані фактори.

Блез Паскаль і П'єр-Сімон Лаплас підкреслювали значення ймовірностей у визначенні ризику, а Джон Мейнард Кейнс і Кеннет Ерроу звертали увагу на суб'єктивні очікування і роль страхування та диверсифікації. Поль Самуельсон наголошував на важливості математичного аналізу в розумінні ризику.

Отже, аналіз визначень ризику, запропонованих різними вченими, демонструє різноманітність підходів до цього поняття. Ризик розглядають як невід'ємний аспект невизначеності, який можна кількісно оцінювати за допомогою ймовірностей і математичних моделей. Кожне визначення підкреслює специфічні аспекти ризику, важливі для певної галузі знань, і відображує еволюцію наукового розуміння цієї концепції.

Ці визначення підкреслюють різні аспекти ризику, такі як ймовірності, варіативність результатів, інформаційна невизначеність і неконтрольовані фактори. Кожне з них відображує унікальний підхід до розуміння ризику в контексті певної наукової дисципліни. Отже, аналіз різних визначень ризику показує, як ця концепція інтегрована в різні галузі знань та еволюціонує з часом.

Проаналізувавши різні визначення ризику, запропоновані видатними вченими, можна виявити кілька спільних аспектів, які характеризують це поняття. Усі

визначення підкреслюють зв'язок ризику з невизначеністю і ймовірностями, а також акцентують увагу на можливості кількісного оцінювання ризику за допомогою математичних моделей.

Отже, на основі узагальнення цих визначень можна запропонувати таке визначення ризику: *ризик — це сукупність імовірності виникнення небажаних подій, пов'язаних з невизначеністю, і їхніх результатів, які можна кількісно оцінити за допомогою математичних моделей та аналізу, ризик передбачає наявність варіативності в можливих результатах і включає як об'єктивні, так і суб'єктивні фактори, що впливають на ухвалення рішень в умовах невизначеності.*

Узагальнюючи поняття ризику, визначене різними вченими, можна виділити кілька головних аспектів. Ризик розглядають як вірогідність небажаного результату або події, що може бути кількісно оцінено за допомогою математичних моделей і аналізу. Величину ризику визначають через поєднання ймовірності події та потенційних втрат, до яких вона може призвести.

Зв'язок ризику з поняттям невизначеності полягає в тому, що обидва терміни вказують на невизначеність щодо майбутніх подій. Невизначеність вказує на загальний стан невизначеності, коли точний результат або ймовірність події не відомі, тоді як ризик фокусований на конкретній події або результаті і оцінений за ймовірністю та можливими наслідками.

Схожість між цими поняттями полягає в їхньому спільному акценті на невизначеність і відсутність повного знання майбутнього. Обидва поняття важливі для управління ризиками та ухвалення рішень в умовах невизначеності.

Водночас різниця полягає в тому, що ризик зазвичай стосується конкретних подій або ситуацій, де можна оцінити ймовірність і вплив, тоді як невизначеність є більш загальним поняттям, що описує загальний стан невизначеності без зазначення конкретних результатів або ймовірності.

Ризик є складним і багатогранним поняттям, яке відіграє важливу роль в ухваленні рішень та управлінні невизначеністю. Від ранніх спроб зрозуміти і кількісно оцінити ризик до сучасних математичних моделей і технологій наше розуміння ризику значно еволюціонувало. Наукова думка про ризик продовжує

розвиватися, ураховуючи нові виклики і можливості, які виникають у світі, що швидко змінюється.

І ризик, і невизначеність є важливими концепціями у сфері управління та ухвалення рішень, але вони мають свої відмінності. Ризик фокусований на конкретних подіях і їхніх можливих наслідках, тоді як невизначеність є більш загальним поняттям, яке описує стан невизначеності без зазначення конкретних результатів або ймовірності. Обидва поняття важливі для аналізу та управління ризиками в різних сферах діяльності.

1.3 Класифікації невизначеностей та ідентифікація факторів невизначеностей, що впливають на процеси управління експлуатаційною роботою залізничного транспорту

Як було з'ясовано вище, невизначеність є невід'ємною характеристикою багатьох процесів і систем, які ми зустрічаємо у природі, технологіях, економіці та суспільстві. Вона виникає через обмеженість наших знань, випадковість подій, недосконалість методів вимірювання та інші фактори. Розуміння та класифікація невизначеностей є головними для ефективного управління ризиками, ухвалення рішень і оптимізації процесів у різних сферах діяльності.

Класифікація невизначеностей дає змогу систематизувати різні види невизначеностей за певними критеріями, що сприяє кращому їх розумінню та вибору відповідних методів управління ними. Серед основних підходів до класифікації невизначеностей можна виділити поділ їх за джерелом виникнення, природою, характером, впливом на рішення, тривалістю впливу, можливістю контролю і ступенем впливу на результати.

Отже, у сучасній сфері управлінні, зокрема управлінні транспортними системами, важливе значення має облік невизначеності, яка може виникати з різних джерел і істотно впливати на досягнення цілей і результати. Для більш

систематичного підходу для аналізу та управління невизначеністю розроблено різні схеми класифікації факторів невизначеності. На рисунку 1.1 наведено схему, що зображує найбільш затребувані види класифікації факторів невизначеності, використовувані у сфері технічного управління. На схемі подано види класифікації за декількома аспектами: природа виникнення, спосіб квантифікації, можливість контролю, характер, тривалість впливу, можливість контролю, характер, тривалість впливу.

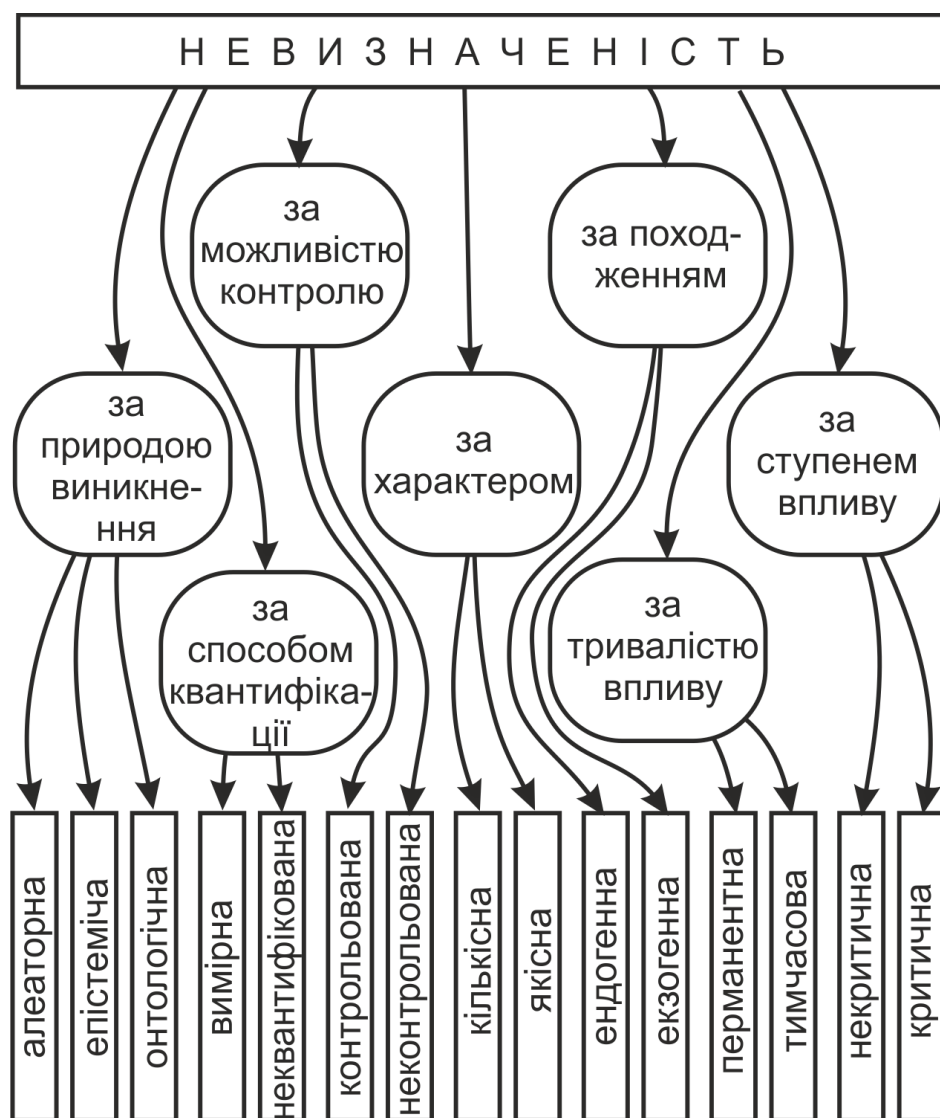


Рисунок 1.1 – Найбільш використовувані види класифікацій факторів невизначеності

За природою виникнення виділяють три основні категорії невизначеності. Алеаторна невизначеність пов'язана з випадковими подіями, що не піддаються

передбаченню, такими як природні катастрофи або технічні відмови. Епістемічна невизначеність походить із неповноти знань та інформації, включаючи обмеження даних або невизначеність у прогнозуванні. Онтологічна невизначеність відображує фундаментальні обмеження знань про світ, такі як складність поведінки складних систем або обмеження точності вимірювань. Таке популярне поняття, як «чорний лебідь», фактично теж належить до онтологічного типу невизначеності.

Інший аспект класифікації – це спосіб квантифікації невизначеності. Вимірювані фактори невизначеності можуть бути кількісно оцінені з використанням чисельних показників і статистичних методів, у той час як неквантифіковані фактори невизначеності не можуть бути повністю виражені в чисельних значеннях через їхній якісний характер або недостатність даних.

Третій аспект – це можливість контролю за факторами невизначеності. Контрольовані фактори зазнають впливу і мають управління, що дає змогу знизити їхній вплив на результати проєкту чи процесу. Неконтрольовані фактори знаходяться за межами нашого впливу, їх не можна контролювати, що робить управління ними складнішим і потребує адаптивних стратегій.

За характером фактори невизначеності можуть бути кількісними чи якісними. Кількісні фактори виражені в чисельних значеннях і можуть бути виміряні за допомогою математичних методів, у той час як для якісних факторів характерні нечислові значення, і вони потребують оцінювання на основі експертної думки чи досвіду.

Ще одним аспектом є тривалість невизначеності. Перманентні фактори існують протягом усього часу проєкту або процесу і постійно впливають на його результати, тоді як тимчасові фактори виникають у певні періоди часу і можуть бути пов'язані з сезонними коливаннями, короткостроковими ризиками або тимчасовими обмеженнями ресурсів. Нарешті, фактори невизначеності можуть бути критичними чи некритичними за рівнем їхнього впливу на результати проєкту чи процесу.

Критичні фактори, на відміну від некритичних, мають істотний вплив на ключові показники ефективності функціонування системи або протікання виробничого процесу.

Класифікація за природою факторів невизначеності є найбільш популярною, тому що саме вона дає змогу визначити джерела цих факторів. Отже, одним із найпоширеніших підходів є поділ невизначеностей на алеаторні та епістемічні. Алеаторні невизначеності виникають через випадкові події та природні коливання, тоді як епістемічні – через обмеженість наших знань або інформації. Важливим є також розуміння антропогенних невизначеностей, які виникають унаслідок діяльності людини та можуть мати суттєвий вплив на результати.

Детальне вивчення та класифікація невизначеностей дає змогу більш точно моделювати складні системи, оцінювати ризики та ухвалювати обґрунтовані рішення. Це має вирішальне значення для різних галузей, включаючи інженерію, фінанси, медицину, екологію та управління, де невизначеність є постійним супутником процесів і явищ.

Ідентифікація факторів невизначеності в управлінні експлуатаційною роботою залізничного транспорту є важливим етапом забезпечення ефективності та надійності транспортної системи. Вона дає змогу враховувати різні ризики та фактори, які можуть суттєво впливати на виконання ГРП, безпеку та якість обслуговування пасажирів, вантажовідправників і вантажоотримувачів.

У рамках цього процесу доцільно виділити два основні типи невизначеності: алеаторні та епістемічні. Алеаторні невизначеності пов'язані з випадковими подіями та змінами, такими як поломки обладнання, зміни у вантажопотоках і зовнішні кліматичні умови. Ці фактори здебільшого непередбачувані та потребують гнучких стратегій управління ризиками.

З іншого боку, епістемічні невизначеності пов'язані з нестачею знань чи інформації про систему. Це можуть бути помилки в управлінських моделях, невизначеність даних або обмеження в розумінні технологічних процесів. Ідентифікація цих факторів допомагає покращити якість даних і моделей, а також забезпечити більш точне ухвалення управлінських рішень.

Мета ідентифікації невизначеностей в управлінні експлуатаційною роботою залізничного транспорту полягає в забезпеченні безпеки, ефективності та надійності транспортної системи. Розуміння та облік різних видів невизначеностей допомагає

розробити стратегії управління ризиками, оптимізувати операційні процеси та підвищити рівень обслуговування пасажирів і вантажів. Невизначеності, які спостерігають у сфері управління експлуатаційною роботою, доцільно також ідентифікувати як два великі класи: алеаторні та епістемічні, як показано на рисунку 1.2.

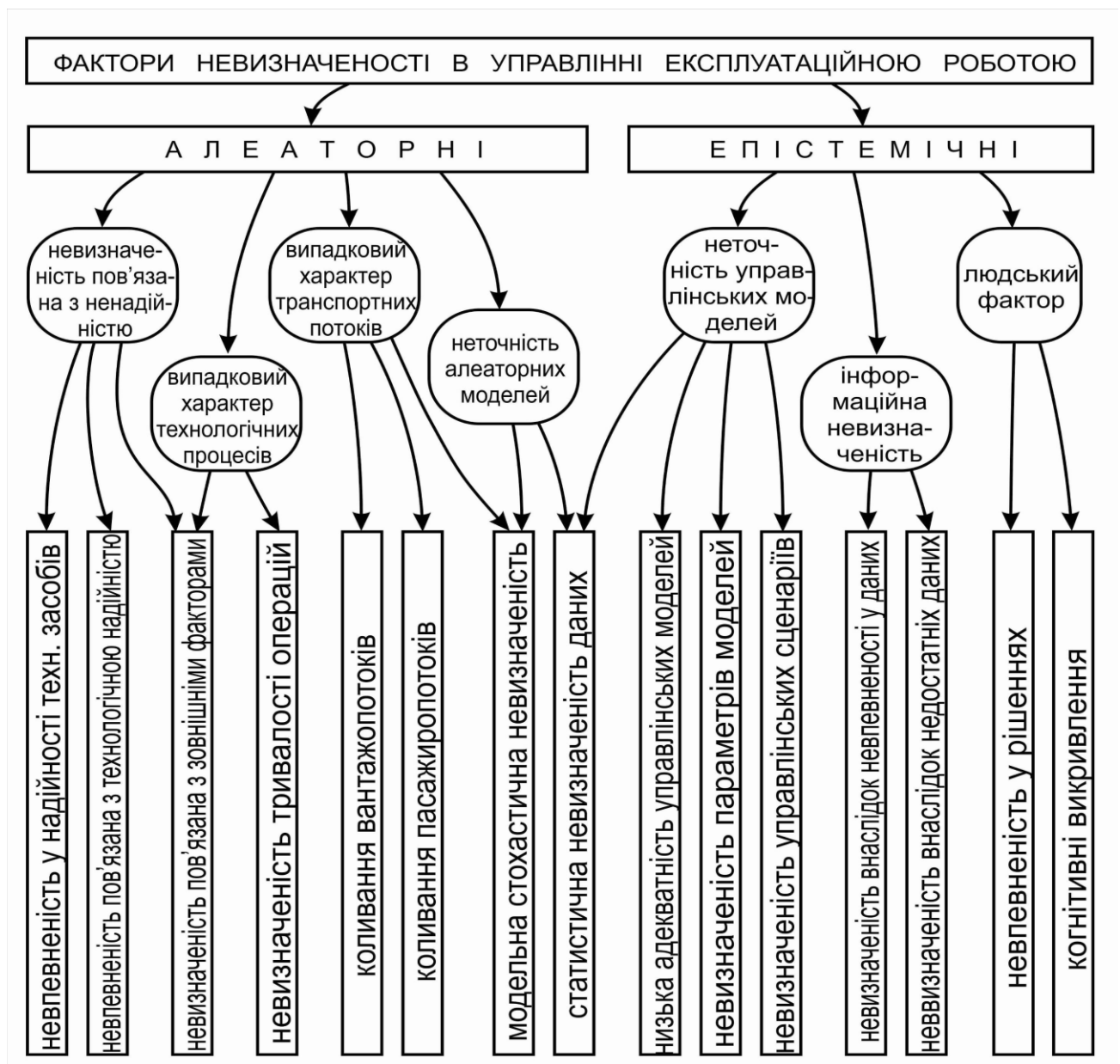


Рисунок 1.2 – Ідентифікація невизначеностей, що впливають на процеси управління експлуатаційною роботою залізничного транспорту

На рівні нижче алеаторні невизначеності додатково деталізують, включаючи такі категорії: невизначеність, пов'язана з ненадійністю, невизначеність, пов'язана з випадковим характером технологічних процесів, невизначеність, пов'язана з випадковим характером транспортних потоків.

Вибір цих конкретних категорій обґрунтований їхньою значущістю для залізничного транспорту і їхнім потенційним впливом на безпеку та ефективність операцій.

Перша категорія - невизначеність, пов'язана з ненадійністю - включає такі фактори: невпевненість у надійності технічних засобів і технологічної надійності. Залізничний транспорт включає складні технічні системи, де навіть невеликі збої можуть мати серйозні наслідки. Тому важливо враховувати можливість поломок і несправностей, які можуть виникнути випадково та непередбачувано.

Друга категорія - невизначеність, пов'язана з випадковим характером технологічних процесів - охоплює варіабельність у виконанні технологічних операцій і їхній тривалості. Це включає вплив зовнішніх факторів, таких як погодні умови, на хід технологічних процесів. Ця невизначеність може суттєво вплинути на планування та виконання операцій з обслуговування та ремонту.

Третя категорія - невизначеність, пов'язана з випадковим характером транспортних потоків – важлива для розуміння мінливості вантажопотоків і пасажиропотоків. Змінна кількість пасажирів і вантажів може впливати на завантаження поїздів, розклад руху та загальну завантаженість інфраструктури. Це також пов'язано з такими факторами, як час пікового навантаження та сезонні зміни в попиті на транспортні послуги.

Отже, вибір цих категорій обумовлений їхнім основним значенням для безпечної та ефективної експлуатації залізничного транспорту, а також їхнім потенційним впливом на різні аспекти транспортної системи. Облік та аналіз їх дають змогу ефективно управляти ризиками та забезпечувати надійність операцій.

Далі розглянемо аспекти, додатково уточнені на рівні алеаторних невизначеностей.

Невизначеність, пов'язана з ненадійністю, невпевненість у надійності технічних засобів. Цей аспект особливо актуальний для залізничного транспорту, де технічне обладнання має інтенсивне використання та зношування. Наприклад, поломки локомотивів або несправності сигнальних систем можуть призвести до збоїв руху поїздів, затримок і навіть аварій. Ураховуючи важливість надійної роботи технічних засобів, необхідно аналізувати ймовірність і наслідки потенційних відмов, а також розробляти заходи щодо їх запобігання та швидкого усунення.

Невпевненість у технологічній надійності. У контексті залізничного транспорту це стосується невизначеності, пов'язаної з виконанням різних технологічних операцій, таких як ТО і ремонт. Наприклад, непередбачені затримки у проведенні технічних робіт через нестачу матеріалів чи персоналу можуть призвести до порушення ГРП і неефективного використання інфраструктури. Тому важливо враховувати можливі причини та наслідки затримок у технологічних процесах і вживати заходів щодо їх мінімізації.

Невизначеність, пов'язана з випадковим характером технологічних процесів. Невизначеність, пов'язана із зовнішніми факторами: вплив зовнішніх факторів, таких як погодні умови або зміни в навколишньому середовищі, може суттєво вплинути на перебіг технологічних процесів. Наприклад, несприятливі погодні умови можуть уповільнити виконання робіт на свіжому повітрі, таких як ремонт шляхів або будівництво нових станцій. Тому важливо враховувати ймовірність і вплив різних зовнішніх факторів для планування та виконання технологічних процесів.

Невизначеність тривалості технологічних операцій. Цей аспект пов'язаний з оцінюванням часу, необхідного виконання різних технологічних завдань. Наприклад, непередбачені труднощі під час проведення ремонтних робіт чи затримки в постачанні матеріалів можуть призвести до збільшення часу виконання робіт і порушення ГРП. Тому важливо враховувати можливі фактори, які можуть впливати на тривалість технологічних операцій, і розробляти плани з урахуванням таких можливих змін.

На рівні епістемічних невизначеностей також доцільно докладно розглянути декілька аспектів.

Невизначеність, пов'язана з неточністю управлінських моделей, включає невизначеність, пов'язану з низькою адекватністю управлінських моделей. У залізничній галузі ці моделі використовують для прогнозування попиту на перевезення, оптимізації розкладів і розрахунку ресурсів. Однак вони можуть бути недостатньо точними через обмеження даних або спрощені припущення. Це може призвести до спотворення результатів аналізу та ухвалення помилкових рішень. Також важлива невизначеність параметрів управлінських моделей, оскільки точність моделей залежить від їхніх значень і параметрів. Наприклад, точність моделей прогнозування може залежати від правильного визначення параметрів, як-от залежність часу затримки поїздів від інтенсивності руху або технічного стану інфраструктури. Важливо також зважати на невизначеність управлінських сценаріїв, де оцінюють різні сценарії розвитку подій і їхні наслідки. Наприклад, під час планування інвестицій у розвиток залізничної інфраструктури чи впровадження нових технологій можуть виникати різні сценарії розвитку подій, кожен із яких пов'язаний із певними ризиками і невизначеностями. Це потребує аналізу та оцінювання можливих наслідків ухвалених управлінських рішень і розроблення адекватних стратегій управління ризиками.

Інформаційна невизначеність відіграє важливу роль, оскільки включає невизначеність, пов'язану з невпевненістю у даних, і невизначеність, пов'язану з недостатністю або неповнотою даних. У залізничній галузі це критично, оскільки точність і актуальність даних про стан інфраструктури, пасажиропотоки або вантажопотоки можуть бути обмежені. Це може призвести до спотворення результатів аналізу та ухвалення помилкових рішень. Важливо також ураховувати невизначеність, пов'язану з недостатністю або неповнотою даних, оскільки відсутність даних або недостатня інформація про різні аспекти транспортної системи може ускладнити адекватне планування та управління ресурсами.

Невизначеність, пов'язана з людським фактором, також відіграє важливу роль. Вона включає невизначеність, пов'язану з невпевненістю в правильності

ухвалених рішень. Наприклад, недостатня поінформованість або брак досвіду персоналу, що управляє, може призвести до помилкових рішень за нестандартних ситуацій на залізниці, що може негативно позначитися на безпеці та ефективності операцій. Важливо звертати увагу на цей аспект, тому що людський фактор є невід'ємною складовою управління і може вплинути на результати і процеси в залізничній галузі.

На рівні нижче епістемічні невизначеності докладніше розвиваються, включаючи такі аспекти: невизначеність, пов'язана з обмеженістю даних, невизначеність, пов'язана з неоднозначністю даних, невизначеність, пов'язана з інтерпретацією даних.

Важливим аспектом категорії «невизначеність, пов'язана з обмеженістю даних» є нестача даних про поточний стан інфраструктури залізничного транспорту. Наприклад, недостатня інформація про стан рейок, мостів, станцій та інших елементів інфраструктури може ускладнити оцінювання технічного стану та визначення ризиків безпеки руху поїздів. Це особливо важливо в контексті забезпечення безпеки пасажирів і вантажів під час експлуатації залізничної системи.

Крім того, відсутність достатньої інформації про пасажиропотоки та вантажопотоки може ускладнити планування та управління транспортними потоками. Наприклад, недостатня інформація про кількість і склад пасажирів і вантажів може призвести до недостатньо точних прогнозів і рішень, що стосуються змін маршрутів або частоти руху поїздів.

Один із головних аспектів категорії «невизначеність, пов'язана з неоднозначністю даних» - це різні джерела даних і їхні протиріччя. У контексті залізничного транспорту дані про різні аспекти операцій можуть надходити з різних джерел і суперечити один одному. Це створює невизначеність щодо того, які дані вважати більш достовірними та використовувати для ухвалення рішень.

Крім того, різні методи збору даних можуть вносити невизначеність в аналіз. Різні методи можуть призводити до різних результатів, що робить інтерпретацію даних складною і схильною до невизначеності. Це може потребувати додаткових

досліджень для з'ясування найбільш надійних методів збору даних і їх адекватного використання.

Важливим аспектом категорії «невизначеність, пов'язана з інтерпретацією даних» є суб'єктивність оцінок та інтерпретацій даних. У рамках залізничної галузі для аналізу даних та ухвалення рішень можуть виникати суб'єктивні оцінки, які можуть відрізнятись у різних учасників процесу. Це може створювати невизначеність щодо того, які висновки вважати правильними та достовірними.

Крім того, невизначеність у прогнозуванні різних сценаріїв розвитку подій також є значною. Прогнозування розвитку подій, як, наприклад, розвиток поїзної ситуації на залізничному полігоні, технічні зміни, та інших факторів може бути складним через невизначеність у даних і складність прогнозування. Це потребує врахування невизначеності в ухвалених рішеннях і розроблення стратегій управління ризиками, ґрунтованих на адекватному аналізі та інтерпретації даних.

Отже, на нижчому рівні епістемічних невизначеностей поглиблюється аналіз обмеженості, неоднозначності та інтерпретації даних у контексті управління експлуатаційною роботою залізничного транспорту.

У межах обмеженості даних докладно розглядають проблему недостатності інформації про стан інфраструктури. Наприклад, недостатня звітність про технічний стан колій або обладнання може зробити аналіз безпеки руху поїздів менш точним і надійним, а нестача даних про пасажиропотоки та вантажопотоки ускладнює адекватне планування та управління транспортними потоками.

У контексті неоднозначності даних розглядають проблему суперечливості інформації від різних джерел. Наприклад, дані про стан інфраструктури або пасажиропотоки можуть розрізнятися в різних джерелах, що створює невизначеність щодо вибору найбільш достовірних даних для ухвалення рішень. Додатково різні методи збору даних можуть давати різні результати, ускладнюючи інтерпретацію інформації і потребуючи додаткового аналізу.

У межах інтерпретації даних виявляють суб'єктивність оцінок і прогнозів. Співробітники та управлінський персонал можуть мати різні точки зору та підходи для інтерпретації даних, що створює невизначеність в ухваленні рішень. Крім того,

невизначеність у прогнозуванні різних сценаріїв розвитку подій може ускладнити ухвалення рішень, оскільки результати прогнозів можуть бути непостійними та залежати від різних факторів.

Цей поглиблений аналіз обмеженості, неоднозначності та інтерпретації даних дає змогу краще зрозуміти та оцінити рівень невизначеності в управлінні експлуатаційною роботою залізничного транспорту, що допомагає розробити більш ефективні стратегії оперування невизначеностями, управління ризиками та ухвалення рішень.

1.4 Класифікація ризиків у технічних системах, ідентифікація ризиків, що виникають у процесі управління експлуатаційною роботою залізничного транспорту

Управління експлуатаційною роботою залізничного транспорту належить до сфери технічного управління. Технічні ризики можна класифікувати за різними критеріями, що допомагає систематизувати їх для більш ефективного аналізу та управління. Розглянемо основні аспекти цієї класифікації. За джерелом ризики поділяють на проєктні та технологічні. Проєктні ризики пов'язані з плануванням, дизайном і реалізацією проєкту. Прикладами можуть бути неправильне оцінювання вимог або планування з недостатніми ресурсами, що може призвести до затримок або збільшення витрат. Технологічні ризики належать до використання нових технологій, розроблення складних систем чи проблем сумісності між різними технічними компонентами. Ці ризики часто виникають через непередбачуваність впровадження нових технологій чи інтеграцію різних систем.

За характером ризики можна поділити на експлуатаційні та зміни вимог. Експлуатаційні ризики зумовлені неполадками в обладнанні, програмному забезпеченні чи технічних системах, що може призвести до простоїв чи необхідності ремонту. Зміни вимог пов'язані зі зміною вимог до проєкту або продукту з боку замовника чи ринку, що може потребувати додаткових ресурсів адаптації проєкту.

За типом впливу ризики поділяють на виробничі та ризики безпеки. Виробничі ризики можуть призвести до недостатньої продуктивності або невідповідності функціональних характеристик очікуванням замовника чи кінцевого користувача. Прикладом може бути зниження продуктивності системи через недооцінювання вимог щодо потужності устаткування. Ризики безпеки пов'язані з загрозами безпеці, такими як можливість злому, витік даних або порушення конфіденційності, що може вплинути на довіру користувачів і призвести до юридичних наслідків.

За ймовірністю і впливом ризики класифікують як високі, помірні та низькі. Високі ризики мають високу ймовірність виникнення і можуть серйозно вплинути на результати проєкту чи продукту. Помірні ризики мають середню ймовірність виникнення і можуть вплинути на результати проєкту або продукту. Низькі ризики мають низьку ймовірність виникнення, ними можна легко управляти з правильним плануванням і контролем.

За часом виникнення ризики поділяють на ризики ранньої та пізньої стадії. Ризики ранньої стадії можуть виникнути на початку проєкту через недостатнє оцінювання або непорозуміння в початкових фазах, наприклад, неправильне розуміння вимог замовника. Ризики пізньої стадії виникають на пізніших етапах проєкту через зміни умов, технічні проблеми чи інші фактори, наприклад виявлення дефектів на етапі тестування чи впровадження.

За величиною наслідків ризики поділяють на катастрофічні, критичні, серйозні, помірні та незначні. Катастрофічні ризики можуть призвести до повного провалу проєкту або серйозних порушень у роботі систем. Прикладом може бути повна відмова системи управління рухом на залізниці. Критичні ризики суттєво впливають на результати проєкту і можуть спричинити значні затримки, додаткові витрати чи погіршення якості продукції, такі як збій головного компонента програмного забезпечення. Серйозні ризики мають помірний вплив на проєкт, викликаючи помітні проблеми, які потребують корегувальних дій, наприклад невідповідність технічних специфікацій окремих компонентів устаткування. Помірні ризики впливають на проєкт, ними можна управляти без значних витрат або

затримок - невеликі дефекти в обладнанні. Незначні ризики мінімально впливають на проєкт, ними можна легко управляти - невеликі відхилення від графіка виконання завдань. Класифікувати ризики у сфері управління технічними системами можна за декількома критеріями (рисунк 1.3).

Ця схема класифікації технічних ризиків дає змогу структурувати і управляти ризиками, урахувуючи їхні різні аспекти і характеристики, визначити пріоритети в управлінні ризиками та розробляти стратегії для мінімізації їхнього впливу на кінцеві результати проєкту.

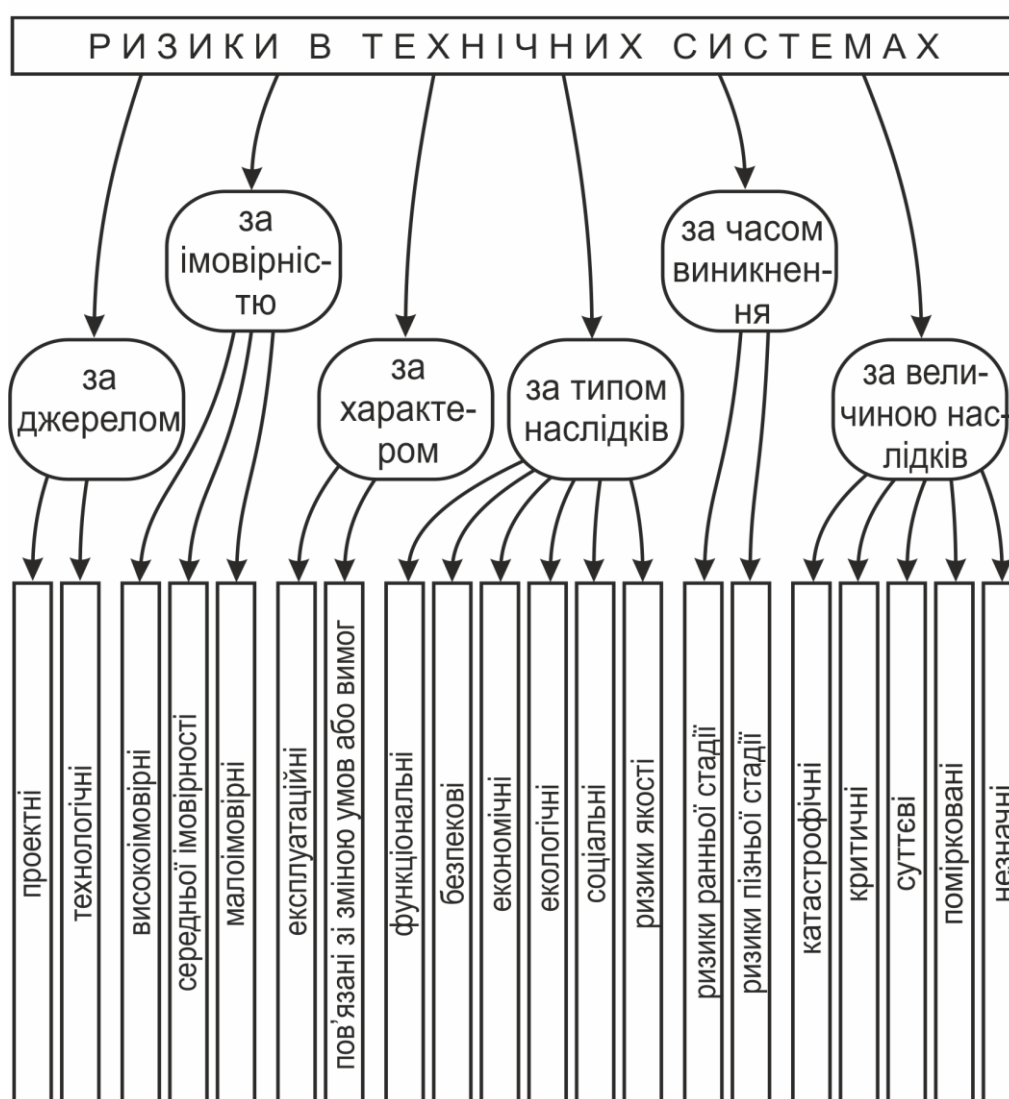


Рисунок 1.3 – Схема класифікації ризиків у сфері управління технічними системами

Управління ризиками в технічних системах, особливо таких складних і критично важливих, як залізничний транспорт, потребує системного підходу для їх

класифікації та ідентифікації. Це дає змогу ефективно прогнозувати, оцінювати і мінімізувати можливі негативні наслідки, пов'язані з різними аспектами експлуатації залізничного транспорту.

1.5 Формалізація та здійснення кількісних оцінок ризиків

Однією з перших і фундаментальних теорій ризику є ТІ, розроблена П'єром-Сімоном Лапласом і Карлом Фрідріхом Гауссом. Вони створили основи для математичного опису випадкових явищ, що дало змогу кількісно оцінювати ризики. Гаусс, зокрема, розробив нормальний розподіл, який став основним інструментом для аналізу ймовірнісних процесів.

Для кількісного оцінювання ризиків використовують різні методи і формули, щоб визначити ймовірність настання ризикової події та величину її наслідків. Нижче наведено основні підходи та формули для кількісного оцінювання ризиків.

Формула ризику, де ризик визначають як добуток імовірності на величину потенційних втрат, є важливою концепцією в аналізі ризику, її широко використовують у різних галузях, таких як фінанси, страхування, управління проектами та інженерія:

$$R = P \times L, \quad (1.1)$$

де P – імовірність, L – величина наслідків.

Одним із перших, хто формалізував цей підхід для оцінювання ризику, був Х. Вільям Хайнріх у своїй праці «Industrial Accident Prevention: A Scientific Approach» (1931). Він розробив модель, яка показувала, як імовірність події (наприклад нещасного випадку) і величина втрат можуть бути використані для оцінювання загального ризику.

Цей підхід отримав подальший розвиток у сфері страхування та фінансів. Ллойд Бленк, розглядаючи ризики у страхуванні, використовував подібну формулу для оцінювання страхових премій і ризиків, пов'язаних зі страхуванням життя і майна.

Ця формула ризику є корисною через свою простоту і наочність. За її допомогою можна кількісно оцінити ризик і порівнювати різні ризики між собою, ураховуючи як імовірність настання події, так і можливі втрати у випадку її настання.

Ця формула підкреслює два основні аспекти ризику. Перший аспект: P – це ймовірність того, що певна подія станеться. Вона може бути оцінена на основі статистичних даних або експертних оцінок. Другий аспект: величина втрат L – це потенційні втрати або шкода, які можуть виникнути в результаті події. Вона може бути виражена в грошових одиницях, людських ресурсах або інших вимірюваних величинах.

Формула дає змогу інтегрувати ці два аспекти в одну кількісну міру, що робить її зручною для використання в аналізі ризику.

Розглянемо приклад із фінансів. Якщо є інвестиція з імовірністю 10 % (0.1) втратити 100 дол., то ризик цієї інвестиції можна оцінити як

$$R = 0,1 \times 100 = 10 \text{ грн.}$$

Це означає, що очікуваний ризик втрати становить 10 грн.

Отже, ця формула ризику є фундаментальною в багатьох сферах, де необхідно оцінити і управляти ризиками. Її застосування допомагає в ухваленні обґрунтованих рішень і управлінні ризиками на основі кількісних оцінок.

Однією з найбільш сучасних теорій, використовуваних для оперування з невизначеностями та ризиками, є ТДШ (англ. Dempster-Shafer theory).

ТДШ, також відома як теорія функцій або теорія доказів, є потужним математичним інструментом для моделювання невизначеності та ухвалення рішень

в умовах неповної інформації. Вона була розроблена Артуром Демпстером і Гленном Шафером у 1960-х та 1970-х роках як узагальнення класичної теорії ймовірностей.

На відміну від класичної теорії ймовірностей, для якої потрібне точне задавання ймовірностей для всіх можливих подій, ТДШ дає змогу працювати з частковими ймовірностями та невизначеними даними. Цього досягають шляхом введення понять «масові функції» і «правила комбінаторики доказів». Масові функції (так звані функції мас Дампстера) визначають імовірність безлічі подій, а не тільки одиночних подій, що дає змогу враховувати невизначеність більш гнучко.

Одним із головних елементів теорії є правило комбінаторики доказів Демпстера - об'єднання кількох джерел інформації для отримання більш точної оцінки ймовірності подій. Це правило враховує конфліктуючі дані та знижує вплив недостовірних джерел, що робить ТДШ особливо корисною у складних системах, таких як системи управління ризиками і технічні системи.

ТДШ знайшла широке застосування в різних галузях, включаючи інженерні системи, медичну діагностику, фінансовий аналіз та управління транспортними системами. Зокрема, у контексті залізничного транспорту вона надає методи для оцінювання та управління ризиками, пов'язаними з експлуатаційною діяльністю, забезпечуючи надійніші та обґрунтовані рішення в умовах невизначеності.

Отже, ТДШ є важливим методологічним інструментом для роботи з невизначеністю і ризиком, даючи змогу більш ефективно управляти складними системами та ухвалювати обґрунтовані рішення в умовах неповної інформації.

ТДШ є важливим інструментом в управлінні ризиками, особливо коли йдеться про обробку невизначеності та комбінування різних джерел інформації. Ця теорія дає змогу працювати з нечіткими даними і комбінувати різні докази для отримання більш точного уявлення про ризики.

ТДШ базована на концепції мас функцій віри (англ. belief functions), використовуваних для визначення ступеня впевненості в гіпотезах. Основні поняття цієї теорії включають:

1. Фрейм дискурсу (Θ): множина всіх можливих гіпотез.

2. Масова функція (m): функція, яка призначає кожній підмножині фрейму дискурсу (Θ) значення в діапазоні від 0 до 1, так що сума всіх значень дорівнює 1.

Масова функція (m) визначає ступінь впевненості, яку можна приписати певній підмножині гіпотез. Основні властивості масової функції:

$$m(\emptyset) = 0, \quad (1.2)$$

$$\sum_{A \subseteq \Theta} m(A) = 1. \quad (1.3)$$

Одним із найважливіших аспектів ТДШ є правило комбінування доказів. Якщо є дві масові функції m_1 і m_2 , що являють собою два незалежні джерела доказів, то їх можна комбінувати за допомогою правила Демпстера:

$$m(A) = \frac{1}{1 - K} \sum_{B \cap C = A} m_1(B) \cdot m_2(C), \quad (1.4)$$

де K - коефіцієнт конфлікту,

$$K = \sum_{B \cap C = \emptyset} m_1(B) \cdot m_2(C). \quad (1.5)$$

Ця формула враховує конфлікт між доказами від різних джерел і нормалізує результуючу масову функцію.

Розглянемо абстрактний приклад. Управляють ТО залізничної компанії. Завдання - визначити ймовірність або ступінь впевненості у відмові обладнання на основі наданих даних.

Припустимо, що в нас є два незалежних джерела інформації про надійність певного компонента залізничної системи. Перше джерело (експертна оцінка) вказує на ймовірність відмови компонента з масовою функцією m_1 . Друге джерело

(статистичні дані) дає масову функцію m_2 . Припустимо, що фрейм дискурсу $\Theta = \{Відмова, Без відмови\}$ і масові функції мають такі значення:

$$m_1(\{Відмова\}) = 0,3,$$

$$m_1(\{Без відмови\}) = 0,5,$$

$$m_1(\{Відмова, Без відмови\}) = 0,2,$$

$$m_2(\{Відмова\}) = 0,4,$$

$$m_2(\{Без відмови\}) = 0,4,$$

$$m_2(\{Відмова, Без відмови\}) = 0,2.$$

Використовуючи правило Демпстера для комбінації масових функцій, розрахуємо нову масову функцію m . Спочатку обчислимо коефіцієнт конфлікту K :

$$K = m_1(\{Відмова\}) \cdot m_2(\{Без відмови\}) + m_1(\{Без відмови\}) \cdot m_2(\{Відмова\}), \quad (1.6)$$

$$K = 0,3 \cdot 0,4 + 0,5 \cdot 0,4 = 0,12 + 0,2 = 0,32.$$

Тепер обчислимо значення комбінованої масової функції m для кожної підмножини:

$$\begin{aligned}
m(\{Відмова\}) = & \frac{1}{1-K} (m_1(\{Відмова\}) \cdot m_2(\{Відмова\}) + \\
& + m_1(\{Відмова\}) \cdot m_2(\{Відмова, Без відмови\}) + \\
& + m_1(\{Відмова, Без відмови\}) \cdot m_2(\{Відмова\}))
\end{aligned}
, (1.7)$$

$$m(\{Відмова\}) = \frac{1}{1-0,32} (0,3 \cdot 0,4 + 0,3 \cdot 0,2 + 0,2 \cdot 0,4),$$

$$m(\{Відмова\}) = \frac{1}{0,68} (0,12 + 0,06 + 0,08) = \frac{1}{0,68} \cdot 0,26 \approx 0,382.$$

Отже, завдяки ТДШ отримано ступінь впевненості у відмові обладнання як агреговане значення на основі інформації з різних джерел, яка часково конфліктує між собою, може бути неповною і мати певний ступінь невизначеності. Так само можна розрахувати інші значення комбінованої масової функції.

ТДШ надає потужний інструмент для роботи з невизначеністю, даючи змогу комбінувати різні джерела інформації для отримання більш точних оцінок ризиків. Вона особливо корисна в складних технічних системах, таких як залізничний транспорт, де необхідно враховувати множинні фактори та невизначеності.

1.6 Висновки до першого розділу

Розглянуто і проаналізовано основні аспекти управління ризиками та невизначеністю в контексті експлуатаційної діяльності залізничного транспорту. Кожен із підрозділів присвячений різним аспектам цієї проблематики, починаючи від онтології невизначеності і закінчуючи кількісним оцінюванням ризиків. Результатом цього дослідження стало глибше розуміння важливості управління

ризиками та невизначеністю в експлуатаційних процесах залізничного транспорту і виявлення можливих стратегій для їх подолання та мінімізації.

Дослідження онтології невизначеності в контексті управління експлуатаційною діяльністю залізничного транспорту показало, що ця галузь насичена різними джерелами невизначеності, які можуть впливати на безпеку та ефективність транспортних процесів. Аналіз визначив, що невизначеність може виникати через різні технічні неполадки, непередбачуваність транспортних потоків і зміни вимог щодо експлуатації систем.

Досліджено концепцію онтології ризику в контексті управління експлуатаційною діяльністю залізничного транспорту. Аналіз показав, що ризики можуть мати різні джерела походження, включаючи технічні проблеми, непередбачуваність виконання транспортних процесів і зміни у вимогах щодо експлуатаційних систем.

Загальний аналіз дав змогу виявити основні фактори ризику в контексті управління експлуатаційною роботою залізничного транспорту і заклав підстави для розробки нових підходів для управління ними. Проведений аналіз також є важливим кроком у напрямі подальшого вдосконалення стратегій управління ризиками в експлуатаційній діяльності залізничного транспорту, він також виявив потребу в подальших дослідженнях у цьому напрямі.

Проаналізовано зв'язок між концепціями ризику та невизначеності в контексті управління експлуатаційною діяльністю залізничного транспорту. Дослідження показало, що ці концепції взаємопов'язані і потребують комплексного підходу до управління ними.

Класифіковано ризики в технічних системах та ідентифіковано ризики, що виникають у процесі управління експлуатаційною роботою залізничного транспорту. Дослідження показало, що ризики можуть мати різні причини та наслідки і потребують системного підходу для управління ними.

Проаналізовано основні види ризиків, які можуть виникати в технічних системах залізничного транспорту, включаючи проєктні, технологічні,

функціональні та безпекові ризики. Кожен із цих видів ризиків має свої особливості та потребує відповідних стратегій управління.

Під час дослідження також виявлено, що ідентифікація ризиків є важливим етапом у процесі управління експлуатаційною роботою залізничного транспорту. Вона дає змогу вчасно виявляти потенційні загрози та розробляти стратегії управління ними для забезпечення безпеки та ефективності експлуатаційних процесів. Також дослідження показало, що кількісне оцінювання ризиків є важливим інструментом для управління ризиками в транспортній галузі.

Розглянуто різні методи та підходи для кількісного оцінювання ризиків, включаючи ймовірнісно-наслідковий аналіз, аналіз впливу та інші. Кожен із цих методів має свої переваги та недоліки, але в цілому дає змогу об'єктивно оцінити ризики у транспортній сфері.

Дослідження також показало, що для ефективного кількісного оцінювання ризиків необхідно мати чітке розуміння вихідних даних, методів і моделей, а також систематично аналізувати ризики на різних етапах управління експлуатаційною діяльністю залізничного транспорту.

Проаналізовано зв'язок між концепціями ризику та невизначеності в контексті управління експлуатаційною діяльністю залізничного транспорту. Дослідження показало, що ці концепції є взаємопов'язаними і потребують комплексного підходу для управління ними для забезпечення безпеки та ефективності експлуатаційних процесів.

Розглянута раніше онтологія невизначеності дала змогу краще розуміти природу і типи невизначеності, які можуть впливати на ризики в залізничному транспорті. Аналіз цього аспекту показав, що ризики часто виникають у ситуаціях невизначеності, тому розуміння їхньої природи є головним для управління.

Класифіковано ризики та невизначеності в технічних системах залізничного транспорту. Цей аналіз показав, що ризики можуть бути різними за природою, способами квантифікації, можливістю контролю, характером, тривалістю і ступенем впливу. Подальший аналіз зв'язку між концепціями ризику та невизначеності

підкреслив важливість урахування цих аспектів для розроблення стратегій управління ризиками у транспортній галузі.

Розглянуто формалізацію та кількісне оцінювання ризиків у контексті управління експлуатаційною діяльністю залізничного транспорту. Цей аналіз підкреслив важливість кількісного підходу для оцінювання ризиків і необхідність використання різних методів та інструментів для об'єктивного оцінювання ризиків у транспортній галузі.

Насамперед ризики та невизначеність є невід'ємною складовою діяльності у транспортній галузі, і їхня повна ідентифікація та аналіз - це важливий етап для забезпечення безпеки та ефективності. Розуміння природи і типів невизначеності дає змогу краще розуміти витoki ризиків і розробляти ефективні стратегії управління ними.

Класифікація ризиків і невизначеностей у технічних системах залізничного транспорту дає змогу систематизувати їх і визначити основні аспекти для подальшого аналізу. Урахування різних характеристик ризиків допомагає краще розуміти їхні впливи та розробляти ефективні стратегії управління.

Кількісне оцінювання ризиків є важливим інструментом для об'єктивного оцінювання ризиків і визначення стратегій управління ними. Використання різних методів і підходів для кількісного оцінювання дає змогу отримувати більш точні та об'єктивні результати, що є важливим для ефективного управління ризиками в транспортній галузі.

Виявлено, що в галузі управління експлуатаційною роботою, ураховуючи її складність і багатогранність, для аналізу ризиків і невизначеності замість традиційних підходів доцільно застосовувати ТДШ, яка дає математичний інструментарій для оцінювання невизначеності та ухвалення рішень за відсутності точних даних. Ця теорія ґрунтована на теорії масових функцій і дає змогу моделювати неоднозначність у знаннях і даних. Формули можуть бути використані для обчислення ступеня ризику на основі набору вхідних параметрів та оцінок.

Що стосується формул, то вони можуть бути різними залежно від конкретного випадку та вибраного методу. Проте загальною ідеєю є врахування вірогідності та

важливості різних можливих результатів і подальше обчислення ступеня ризику на основі цих даних.

Наприклад, у контексті ТДШ можна використовувати формули для обчислення масових функцій, які визначають ступінь достовірності або неоднозначності даних. На основі цих масових функцій можна потім розрахувати ступінь ризику або ймовірність виникнення певних подій.

Однак точні формули і їх використання будуть залежати від конкретного дослідження та методології, вони можуть бути дещо складнішими, ніж може здатися спочатку. Ураховуючи це, доцільно розробити спеціалізовані програмні засоби для моделювання та управління ризиками та невизначеностями в управлінні експлуатаційною роботою залізничного транспорту.

У цілому розроблення ефективних стратегій управління ризиками та невизначеністю у сфері експлуатаційної діяльності залізничного транспорту є складним завданням, яке потребує глибокого розуміння природи ризиків і невизначеностей, систематичного аналізу та використання різних інструментів і методів. Дослідження в цьому напрямі можуть сприяти подальшому вдосконаленню стратегій оперування невизначеністю і управління ризиками та забезпеченню безпеки та ефективності у сфері управління експлуатаційною роботою залізничного транспорту.

РОЗДІЛ 2

АНАЛІЗ ТЕНДЕНЦІЙ І ВИКЛИКІВ У НАУКОВИХ ДОСЛІДЖЕННЯХ У СФЕРІ УПРАВЛІННЯ ЕКСПЛУАТАЦІЙНОЮ РОБОТОЮ ЗАЛІЗНИЧНОГО ТРАНСПОРТУ В КОНТЕКСТІ ОПЕРУВАННЯ НЕВИЗНАЧЕНОСТЯМИ ТА РИЗИКАМИ

2.1 Актуальність наукових досліджень, спрямованих на вирішення проблем, пов'язаних із невизначеностями та ризиками у сфері управління залізничними транспортними системами

Управління експлуатаційною роботою залізничними системами завжди було складним завданням, що потребує врахування численних факторів невизначеності та ризиків. Ця тема є актуальною через її вплив на ефективність і надійність транспортних перевезень, що є критичним для економіки будь-якої країни. Незважаючи на складність, вона постійно привертає увагу наукового співтовариства, яке прагне розробити нові методи та підходи для покращення управління цими системами.

Ризики та невизначеність у залізничних системах можуть виникати з різних причин: технічні несправності, варіабельність пасажиропотоків, погодні умови, вплив людського фактора тощо. Вони призводять до збоїв у розкладі, затримок і збільшення експлуатаційних витрат. З іншого боку, ефективне управління цими ризиками може значно підвищити якість і надійність залізничних перевезень.

Отже, протягом останнього десятиліття інтерес дослідників, як вітчизняних, так і зарубіжних, до проблем невизначеності та ризиків в управлінні залізничними системами не лише не зменшується, а, навпаки, постійно зростає. З кожним роком з'являються нові дослідження і розробки, спрямовані на покращення ефективності та надійності залізничного транспорту. Цей постійний інтерес підкреслює актуальність і важливість теми, спонукаючи наукове співтовариство до пошуку інноваційних рішень і методів.

2.2 Аналіз наукових досліджень, спрямованих на зменшення негативного впливу факторів невизначеності та ризику у сфері організації перевезень на магістральних лініях залізничної мережі

В останні десятиліття наукова спільнота проявляє все більший інтерес до проблем негативного впливу факторів невизначеності та ризику в контексті організації магістральних перевезень і управління роботою залізничних мереж у цілому. Ця актуальна тема викликає неабиякий інтерес серед учених, оскільки потребує розроблення нових стратегій і методів для забезпечення ефективності та надійності транспортних систем в умовах постійних змін у ринкових умовах і технологічних інноваціях.

Автори статті [1] досліджують проблему проектування мережі частотних послуг у системі залізничних вантажних перевезень, де фіксовані і транспортні витрати є невизначеними. У статті доведено, що модель з обмеженнями можливостей може бути перетворена на еквівалентну детерміновану модель транспортування за допомогою зворотного розподілу невизначеності. Ідея невизначених моделей проілюстрована чисельним експериментом.

У статті [2] проаналізовано вплив технічної невизначеності на скорочення відмов у системах залізничного транспорту, зокрема на прикладі системи метро округу Вашингтон (англ. Washington Metropolitan Area Transit Authority, WMATA), детально розглянуто важливість урахування невизначеності у процесі планування та ухвалення технічних рішень із пропонуванням методології для оцінювання та зменшення ризиків у таких системах. Однак, хоча у статті відзначено важливість урахування невизначеності, автори не вдавалися до глибокого аналізу методів урахування цього аспекту і недостатньо розглянули його вплив на кінцеві результати і ухвалення рішень. Також відсутній детальний огляд практичного застосування методології в реальних умовах, що ускладнює оцінювання її ефективності та практичної цінності.

Стаття [3] присвячена вирішенню проблеми проектування мережі обслуговування за частотою в залізничній системі вантажного транспорту. Особливість полягає в тому, що враховано невизначеність фіксованих і транспортних витрат. Запропоновано дві програмні моделі - з обмеженим бюджетом і обмеженими можливостями. Досліджено, як модель з обмеженими можливостями може бути трансформована в еквівалентну детерміновану модель, використовуючи обернений розподіл невизначеності. Зазначено, що такий підхід дає змогу отримати оптимальний план транспорту з обмеженими можливостями та апроксимувати рішення моделі з обмеженим бюджетом. Однак результати недостатньо підкріплені експериментом.

У статті [4] досліджено проблему проектування мережі обслуговування за частотою в системі залізничного вантажного транспорту з невизначеними витратами. Запропоновано дві невизначені програмні моделі, які враховують невизначеність у вартості і фіксованих витратах, щоб оптимізувати систему транспортування. У цій статті, як і попередній, використано поняття оберненого розподілу невизначеності. Проте у статті ідентифіковано не всі важливі фактори невизначеності, які можуть впливати на ефективність моделей у реальних умовах.

У статті [5] досліджено оптимізацію мережі стійкого постачання в умовах зміни кліматичних регуляторних норм і зростаючої обуреності споживачів від викидів вуглецю. Автори використовують технології великих даних для розроблення оптимальних рішень у плануванні транспорту і роздрібної торгівлі продукцією в умовах невизначеності. Особливістю статті є те, що використано теорію невизначеності для характеристики параметрів і моделювання різних політик вуглецевого регулювання. Проаналізовано чотири моделі оптимізації, а їхній вплив на ефективність мережі постачання досліджено шляхом обчислювальних експериментів. Недоліком може бути відсутність урахування деяких аспектів невизначеності та ризику, таких як раптові зміни в економічному середовищі або геополітичні фактори.

У статті [6] досліджено стійку зворотну логістику для використаних автомобілів в Ірані в контексті нових глобальних регуляцій у сфері ланцюгів

постачання і сталого розвитку. Розглянуто реальні і невизначені ситуації з великим обсягом даних між об'єктами зворотної логістики та використання технологій переробки. Основною метою є мінімізація загальних витрат на стійку сталий процес зворотної логістики. Застосовано алгоритм Cross-Entropy для оптимізації моделі в умовах невизначеності, що дає змогу розглядати різні сценарії та їхній вплив на витрати. Недоліком є відсутність аналізу певних ризиків, таких як зміни в регулюванні або неочікувані соціальні фактори, що можуть вплинути на ефективність рішень і знизити точність прогнозів.

У статті [7] запропоновано модель вимірювання стійкої екологічної ефективності ланцюгів постачання через Multi-Regional Input–Output підхід, що дає змогу аналізувати складність і глобальність цих систем. Особливий акцент зроблено на вплив невизначеності, пов'язаної з динамікою викидів вуглецю в металургійній промисловості країн BRICS протягом 20 років, а також ризики, що виникають через технологічні зміни та економічне зростання. Хоча модель дає змогу оцінити потенціал зниження екологічного відбитку, проблеми стандартизації та інші фактори ризику можуть залишатися недостатньо врахованими.

Дослідження [8] пропонує математичний підхід для переналаштування розкладу залізничних перевезень з акцентом на невизначеність і ризики в управлінні пріоритетами поїздів. Модель преємптивного цільового програмування адаптовано для мінімізації загальних затримок і максимізації надійності обслуговування, ураховуючи операційні обмеження і потреби оператора. Спочатку мінімізують затримку з урахуванням пропускної спроможності, після чого оптимізують надійність для поїздів із затримкою до п'яти хвилин. Хоча програмна реалізація автоматично генерує рішення, обмежена перевірка реальних даних підвищує ризик недостатньої валідації моделі.

У статті [9] проаналізовано оптимізаційну задачу перепланування та перенаправлення поїздів на кількох станціях під час проведення ТО, що порушує наявні графіки. Проблема вирішують через мезоскопічну просторово-часову модель із застосуванням бінарного цілочисельного програмування, яке змінює час і маршрути поїздів. Порівнюють два методи: релаксація Лагранжа (англ. LR) і

альтернативний метод множників (англ. ADMM). ADMM забезпечує точніші межі та потребує менше ітерацій. Гнучке використання колій зменшує затримки та скасування поїздів. Однак недоліком є обмежена практична перевірка результатів у різних умовах, що може поставити під сумнів універсальність моделі.

У статті [10] розглянуто аспекти невизначеності та ризику, пов'язані з упровадженням нових технологій у залізничному транспорті. Нові технології, такі як розподілена електротяга і автоматичні з'єднання вагонів, можуть створити нові можливості для оптимізації залізничних маршрутів і підвищити ефективність перевезень, проте вони також можуть викликати технічні труднощі або генерувати потенційні ризики. Отже, у статті звернено увагу на аналіз можливих ризиків і невизначеностей, що можуть виникнути з упровадженням цих технологій.

2.3 Аналіз наукових публікацій, спрямованих на нівелювання впливу невизначеності та ризику у сфері управління експлуатаційною роботою технічних залізничних станцій

Наукові дослідження, націлені на покращення рівня керованості шляхом нівелювання впливу факторів невизначеності та ризику у сфері управління експлуатаційною роботою ТС, таких як сортувальні, дільничні, вантажні і припортові станції, насичені численними підходами і моделями, спрямованими на покращення ефективності їх функціонування і використання рухомого складу, а також експлуатаційної надійності їхнього технологічного процесу. Останні дослідження зазначають про розроблення оптимальних стратегій управління, які враховують комплексні аспекти впливу зовнішніх і внутрішніх факторів, що можуть впливати на роботу залізничних станцій у непередбачуваних умовах.

У статті [11] досліджено оптимізацію роботи залізничних терміналів із кількома сортувальними пунктами через математичну модель, що мінімізує витрати на рух поїздів, реорганізацію вагонів і маневри. Пропоновано двоетапний підхід із

жадібний алгоритмом і асинхронною ітераційною евристикою для оптимального розподілу вагонів. Особливий акцент зроблено на координації технічних операцій для підвищення ефективності залізничної мережі з урахуванням невизначеності та ризиків через зміни в розкладі. Проте основним недоліком є висока складність моделі та потреба в значних обчислювальних ресурсах.

У статті [12] розглянуто ефективність використання СС для залізничних вантажних перевезень з акцентом на сортувальних процедурах. Класифіковано різні підходи для сортування, що корисно для дослідників і практиків. Розглянуто також проблеми управління в умовах невизначеності, включаючи варіативність часу прибуття поїздів і доступність колій. Основним недоліком статті є те, що не запропоновано новітніх методів оптимізації для вирішення проблем, пов'язаних із невизначеністю. Більш сучасні підходи могли б покращити точність і надійність моделей.

У статті [13] розглянуто проблему скорочення часу перебування порожніх вагонів на сортувальних станціях за допомогою технологій реального часу та автоматизованого корегування розкладу. Запропонована методологія передбачає динамічне переназначення вагонів із використанням швидкого алгоритму, що підвищує ефективність. Особливу увагу приділено управлінню в умовах невизначеності, зокрема варіативності часу прибуття та відправлення, що дає змогу краще оцінювати ризики та їхній вплив на СС(розшифрування?). Недоліком статті є обмежений розгляд сучасних методів оптимізації, які могли б підвищити ефективність. Попри це автори дослідження зробили важливий внесок у підвищення надійності залізничних систем.

У статті [14] досліджено оптимізацію процесу доставлення та прибирання вагонів на залізничній станції з різноманітними вантажними операціями. Основна мета – мінімізація часу руху між операційними точками та очікування локомотива, що є критично важливим у контексті невизначеностей і ризиків, таких як технічні збої та зміни в розкладі поїздів. Автори пропонують математичну модель, яка охоплює розподіл вагонів на партії та оптимізацію операцій. Однак недоліком є

недостатня увага до аналізу ризиків і невизначеностей, що обмежує практичну застосовність моделі в умовах реальних експлуатаційних викликів.

У статті [15] розглянуто проблему організації доставлення та прибирання вагонів на залізничній станції з різними місцями вантажних операцій з акцентом на мінімізацію часу руху та очікування локомотива. Запропонована загальна математична модель урахує процеси реверсу, розподілу вагонів на партії та їхню оптимальну кількість для операцій. Експериментальне дослідження на реальній станції підтвердило ефективність запропонованого підходу. Однак використання лише алгоритму імітації відпалювання обмежує модель у вирішенні більш складних завдань, що вказує на необхідність впровадження більш потужних методів оптимізації.

Стаття [16] присвячена розробленню симуляційної платформи для оптимізації системи розміщення та вивезення вагонів у гілкоподібній мережі вантажних операцій (PTWS-BSFON). Основний акцент зроблено на ієрархічних стратегіях PTWS-SO та PTWS-SSMS, модельованих і тестованих на платформі, демонструючи ефективність підходів у реальних сценаріях. Метод PTWS-BSFON об'єднує фазові часові симуляції, байєсівські підходи і стохастичні мережі для врахування ймовірнісних факторів і динамічних змін. Однак у статті не визначено чітких меж застосування розроблених моделей, що залишає питання щодо їхньої універсальності.

2.4 Аналіз науково-практичних розробок, спрямованих на ефективну протидію впливу факторів невизначеності та ризику у сфері організації процесу пасажирських залізничних перевезень

Сфера управління експлуатаційною роботою в системах пасажирських перевезень залізничного транспорту також не позбавлена впливу факторів невизначеності та ризику. Невизначеність у визначенні пасажирського попиту,

технічні несправності, кліматичні умови та інші фактори становлять значні виклики для забезпечення безпеки, зручності та ефективності перевезень. Наукові дослідження в цій галузі спрямовані на розроблення стратегій і технологій, що дають змогу зменшити ці ризики та оптимізувати управління для забезпечення надійності та задоволення потреб пасажирів.

Науково-практичні дослідження, спрямовані на зниження впливу невизначеності та ризику в організації пасажирських залізничних перевезень, ілюструють зростаючий інтерес до розвитку стратегій, спрямованих на оптимізацію безпеки та комфорту тих, хто подорожує. Останні наукові розробки акцентують увагу на створенні адаптивних підходів управління, що враховують різні сценарії та економічні обмеження, з метою забезпечення ефективного рівня обслуговування та мінімізації цих негативних впливів на функціонування систем пасажирських перевезень різних країн світу.

У статті [17] проаналізовано вплив зовнішніх і внутрішніх факторів на відхилення від офіційних розкладів і затримки в щоденній роботі поїздів, підкреслюючи необхідність ефективних методів перепланування розкладів для відновлення порушених послуг. Оцінено основні невизначеності в часі та маршрутизації і їхній вплив на перепланування під час збоїв. Виявлено, що сучасні методи не повною мірою відповідають практичним вимогам, таким як динамічна природа збоїв. Незважаючи на глибокий аналіз, у статті не враховано новітні методи оптимізації та штучного інтелекту, що могли б суттєво поліпшити перепланування в умовах динамічної невизначеності.

У статті [18] проаналізовано проблему перепланування в залізничній системі Паризького регіону, зосереджуючись на стратегіях пропускання зупинок поїздами та корегування графіків обслуговування для швидшого відновлення після незначних порушень. Оскільки ресурси масових транспортних систем спільно використовують, невеликі порушення можуть спричиняти значні затримки. Для вирішення цієї проблеми в статті пропоновано інтегровану модель Інтервального Лінійного Програмування, яка оптимізує час відновлення та мінімізує час очікування

пасажирів. Недоліком є обмежені експерименти на реальних даних, що може знизити універсальність і практичну застосовність моделі.

Автори статті [19] зосереджені на дослідженні оптимізації стратегії пропускання зупинок (англ. skip-stop) у системах міського залізничного транспорту, що відповідає темі невизначеностей і ризиків у контексті управління громадським транспортом. Пропоновано математичну модель для мінімізації середнього часу подорожі пасажирів шляхом оптимального розподілу зупинок між поїздами. Модель включає релаксацію і лінійаризацію для ефективного розв'язання задачі та евристичний алгоритм для обробки великих обсягів даних. Однак вирішення проблеми практичності моделі залишається відкритим викликом.

У статті [20] пропоновано інтегровану комбіновану оптимізаційна модель планів зупинок поїздів і розкладів з урахуванням змінного пасажирського попиту в часі для досягнення високоякісного розкладу та врахування більш реалістичних умов експлуатації. Для вирішення цієї проблеми розроблено розширений адаптивний алгоритм пошуку великомасштабних околиць. Результати показали, що запропонований підхід одночасно зменшує загальний час очікування та затримок пасажирів, а також час руху поїздів із використанням короткого часу обчислення, що демонструє ефективність моделі та підходу. Однак у статті не визначено межі застосування запропонованої моделі.

Дослідження [21] присвячене проблемі оптимізації часу очікування пасажирів у міських метрополітенах в умовах випадкових втручань. Основна ідея полягає в застосуванні мета-модельного підходу, що об'єднує методи дискретно-подійної симуляції та методологію поверхні відгуку (англ. RSM). Це дає змогу збирати користь від обох методів, забезпечуючи високу точність у визначенні відповідей системи на змінні умови експлуатації. У статті зазначено про невизначеність і ризик, пов'язані з рухом поїздів у метрополітені. Однак важливо вдосконалити обчислювальну ефективність запропонованого алгоритму моделювання, особливо для роботи з великими обсягами даних.

Стаття [22] присвячена розробленню модельного фреймворку для проблем з управлінням поїздами, пропонуючи новий метод колаборативної оптимізації для

планування зупинок поїздів і розкладу руху поїздів на тактичному рівні. Застосування показників планування зупинок як ключових змінних рішення формалізовано у вигляді багатоцільової моделі змішаного цілочисельного програмування, яка ефективно оптимізована за допомогою лінійних методів зваження. Теоретичний аналіз підтверджує, що сформульована модель є моделлю оптимізації великого масштабу для реальних застосувань, однак бракує результатів його застосування на практиці.

У статті [23] проаналізовано вплив регулярного технічного обслуговування (ТО) на розклад високошвидкісних поїздів у Китаї. Для цього запропоновано три режими експлуатації, щоб оптимізувати маршрути між високошвидкісними та звичайними лініями. Модель змішаного цілочисельного програмування (MILP) урахує вікна ТО і дає змогу зменшити затримки поїздів через регулювання SDSA (англ. Service-Driven Scheduling Adjustment). Експерименти на основі реальних даних підтвердили ефективність моделі щодо мінімізації часу очікування поїздів. Недоліком є недостатня деталізація для вибору лінеаризаційних технік і обмежене застосування моделі в складніших умовах.

Стаття [24] присвячена інтеграції перепланування та перенаправлення поїздів на кількох станціях високошвидкісної залізниці для запланованого ТО, що робить сучасні розклади неможливими. Проблема модельована за допомогою мезоскопічної просторово-часової мережі, а для її вирішення пропонована бінарна цілочисельна програма, яка змінює часи й маршрути поїздів. Використано два підходи: релаксація Лагранжа (англ. LR) і метод альтернативного множника (англ. ADMM). ADMM показав кращі результати, потребуючи менше ітерацій і даючи жорсткіші верхні межі. Основний недолік — складність реалізації моделей у реальних умовах.

2.5 Аналіз наукових досліджень, спрямованих на приборкання негативного впливу факторів невизначеності та ризику у сфері інтермодальних вантажних перевезень із залученням залізничного транспорту

Наукові дослідження, присвячені інтермодальним вантажним перевезенням із використанням залізничного транспорту, відзначені активним вивченням стратегій оптимізації логістичних потоків і забезпеченням ефективності управління перевезеннями. Зокрема, у контексті таких досліджень особливу увагу приділяють аналізу та мінімізації впливу факторів невизначеності і ризику. Про негативні наслідки таких факторів, як зміни у ГРП і контактних графіків взаємодії між різними видами транспорту, розклади виконання технологічних операцій, несподівані транспортні пригоди чи зміни в логістичних ланцюгах, зазначено у великій кількості досліджень.

У статті [25] досліджено організацію транскордонних залізничних перевезень між Китаєм і Лаосом з акцентом на вплив як інфраструктурних факторів, так і митних регламентів. Модель розрахунку часу перевезень урахує швидкість поїздів, час митного оформлення та мультимодальні перевезення. За результатами, китайсько-лаоська залізниця скорочує час транспортування на понад 20 % порівняно з автомобільними перевезеннями, а митне оформлення займає від 20 до 60% загального часу. Однак у статті не враховано пропускну спроможність залізниці та інші ризики, що обмежує її практичність.

У статті [26] розглянуто модель для середньострокового планування в інтермодальній системі «залізниця-автомобільний транспорт». Запропоновано модель цілочисельного лінійного програмування, яку через складність розв'язують за допомогою евристичної процедури, що забезпечує результати в межах 1 % оптимального рішення. Важливим є врахування варіативності часу прибуття і попиту, що зменшує ризики та дає змогу адаптуватися до непередбачуваних змін. Недоліком є обмежений аналіз сучасних методів оптимізації та довгострокових стратегій управління невизначеністю.

У статті [27] досліджено операції з перевантаження між суднами та поїздами в залізничних терміналах портів. Запропонована модель змішаного цілочисельного програмування (MIP) дає змогу одночасно визначати графік руху поїздів (ГРП) і план перевантаження контейнерів для мінімізації загальних операційних витрат. Модель враховує часові вікна обслуговування і спрощує деякі змінні без втрати оптимальності. Експерименти демонструють значний вплив пропускної спроможності та вартості зберігання на ефективність перевантажувальних операцій. Переваги статті включають інтеграцію двох підзадач і посилення обмежень для швидшого розв'язання задачі. Однак недоліком є недостатня увага до ризиків, пов'язаних із коливаннями попиту і операційними перешкодами.

У статті [28] досліджено проблему динамічного ціноутворення в умовах невизначеності в управлінні контейнерними морсько-залізничними інтермодальними перевезеннями. Запропонована двоетапна модель інтегрує розподіл слотів і динамічне ціноутворення для збільшення прибутків оператора. Перший етап сфокусований на довгостроковому розподілі слотів на контрактному ринку, а другий — на динамічному ціноутворенні на вільному ринку. Для вирішення проблеми невизначеності попиту використовують методи програмування з обмеженнями випадків і робастної оптимізації. Симуляції підтверджують ефективність цих підходів. Переваги роботи включають застосування робастної оптимізації для врахування ризиків і невизначеності, а також підтвердження ефективності моделей через симуляції. Однак недоліком є відсутність детального опису практичної реалізації моделей у реальних умовах, особливо в контексті змін попиту і непередбачуваних ринкових умов.

У статті [29] досліджено управління слотами в контейнерному морсько-залізничному інтермодальному транспорті з метою підвищення ефективності системи. Запропонована двоетапна модель оптимізації управління слотами враховує різні маршрути, тарифи та сегментацію клієнтів. На першому етапі вирішено управління слотами для контрактних клієнтів і порожніх контейнерів, на другому етапі — для загальних і термінових клієнтів. Метод детермінованого лінійного програмування (DLP) використовують для моделювання відносно стабільного

попиту на першому етапі, а метод стохастичного лінійного програмування (SLP) — для врахування невизначеності попиту на другому етапі. Практичний приклад підтверджує життєздатність моделі. Ця стаття є важливою в контексті дослідження невизначеності та ризику, оскільки ефективно розглядає управління слотами за умов змінного попиту. Перевагами є застосування стохастичних методів для зменшення ризиків, що забезпечує більшу адаптивність системи. Недолік - відсутність детального обговорення інтеграції моделі в сучасні системи управління, що може ускладнити її впровадження на практиці.

У статті [30] зазначено про проблему вибору найефективнішого алгоритму диференціальної еволюції (DE) для вирішення реальних задач, ураховуючи, що жоден із наявних алгоритмів не може стабільно добре працювати для всіх типів задач. Запропоновано стратегію багатоваріантного вибору алгоритму, орієнтовану на продуктивність (PMSS), яка включає механізм навчання-забування для оновлення ймовірності вибору кожного алгоритму DE. Це допомагає забезпечити вибір найбільш ефективного алгоритму під час пошукового процесу. Результати перевірки PMSS на тестових задачах демонструють його високу ефективність і продуктивність, а також успішне застосування для оптимізації енергоспоживання в морсько-залізничному транспорті. Стаття є важливою в контексті управління невизначеністю, оскільки пропонує спосіб автоматичного вибору найбільш прийняттого алгоритму в умовах невідомих характеристик задачі. Перевагами є використання PMSS для реальної задачі оптимізації, що підтверджує його практичну значущість. Недолік - відсутність детального обговорення обмежень і вимог для застосування PMSS в різних умовах, що може ускладнити адаптацію методу до нових типів задач.

Стаття [31] присвячена оптимізації параметрів інтермодальних терміналів у контексті численних невизначеностей, таких як погані погодні умови, зміни розкладів суден і поломки обладнання. Основною метою дослідження є розроблення адаптивного та гнучкого стратегічного планування для управління такими терміналами. Використано двоетапну оптимізацію за допомогою платформи AnyLogic, що включає комбінацію агентного моделювання з іншими симуляційними

підходами. Розроблено гібридні моделі симуляції, зокрема модель системної динаміки для оцінювання попереднього впровадження сухих портів і модель дискретно-подійної симуляції для оцінювання інвестицій у термінали. Результати кейс-стаді одного з найзавантаженіших портів Китаю підтверджують валідність розроблених моделей. Стаття стосується теми невизначеності та ризику, підкреслюючи необхідність гнучкого планування для управління терміналами в умовах непередбачуваних змін. Перевагами є комплексний підхід для моделювання та надання практичного інструментарію для покращення процесу ухвалення рішень. Недолік - можливе недостатнє врахування всіх можливих сценаріїв невизначеності та обмежень, що можуть виникати в різних умовах експлуатації. Тим не менш, стаття - це важливий внесок у розуміння управління інтермодальними терміналами в умовах ризику.

У статті [32] розглянуто оптимізацію залізничних операцій у морських портах, які є важливою ланкою між залізничним і морським транспортом. Метою дослідження є привернення уваги до проблем управління в портових зонах, де виникають труднощі через непередбачувані умови, такі як зміни розкладу суден, погодні умови і технічні збої. Ці фактори створюють невизначеність і ризику, які необхідно враховувати для покращення ефективності роботи портів. Стаття має значну цінність завдяки детальному огляду літератури і опису викликів оптимізації, що робить її корисною для дослідників і практиків у галузі інтермодальних перевезень. Автори акцентують на потребі розроблення нових підходів для подолання сучасних проблем. Недолік - переважно теоретичний підхід і відсутність конкретних методів або експериментальних даних, що обмежує практичну цінність статті.

У статті [33] розглянуто проблему перевантаження на залізничних терміналах морських портів, зокрема шаблон розкладу поїздів і план перевантаження контейнерів. Оператори повинні координувати розміщення поїздів із часом розвантаження суден, щоб максимізувати пряме перевантаження контейнерів і мінімізувати їх зберігання. Модель цілочисельного програмування включає адаптивний горизонт і стратегію повернення. Тестування показало, що

вантажопідйомність кранів на рейках критично впливає на продуктивність. Проблеми можна вирішити, подовжуючи час обслуговування поїздів і підвищуючи потужність локомотивів. Стаття важлива для управління ризиками і невизначеністю, допомагаючи знижувати затримки і неефективність. Переваги - адаптивність і гнучкість алгоритму, але недостатньо розглянуто практичне впровадження в реальних умовах.

У статті [34] досліджено роль доступу до внутрішніх районів у підвищенні конкурентоспроможності морських портів. Внутрішній транспорт, зокрема автомобільні дороги, залізниці, водні шляхи і трубопроводи, критично важливий для переміщення вантажів до і з портів. Якість цього доступу впливає на конкурентоспроможність портів і залежить від багатьох зацікавлених сторін, таких як судноплавні компанії, оператори терміналів, експедитори, адміністрація портів і уряд. Запропоновано концепцію «режиму доступу до внутрішніх районів», що забезпечує структурований підхід до управління та поліпшення цього доступу. Дослідження охоплює три морських портових кластери: Роттердам, Дурбан, Нижній Міссісіпі, і показує значні відмінності в якості доступу між цими кластерами. Вивчено можливості покращення доступу, включаючи вдосконалення інфраструктури, координацію між зацікавленими сторонами, політичні втручання і технологічні інновації для оптимізації операцій. Стаття важлива для управління невизначеністю в морській логістиці. Однак не детально проаналізовано вплив сучасних технологій і недостатньо висвітлено приклади впровадження покращень у реальних умовах.

У статті [35] розглянуто проблему морсько-залізничних перевантажувальних операцій у терміналах портів, зокрема шаблони розкладу поїздів і плани перевантаження вхідних контейнерів. В умовах обмежених ресурсів і часових рамок оператори повинні визначити час прибуття і відправлення поїздів для координації з часом розвантаження суден і планом перевантаження контейнерів з метою максимізації прямих перевантажень і мінімізації часу зберігання. Модель цілочисельного програмування включає адаптивний підхід із ковзним горизонтом і зворотним відстеженням. Результати показують, що вантажопідйомність козлових

кранів на рейках має суттєвий вплив на ефективність перевантаження, і його негативний вплив можна зменшити шляхом продовження часу обслуговування поїздів і підвищення потужності маневрових локомотивів. Стаття важлива для управління ризиками в умовах обмежених ресурсів і змінних часових рамок у перевантажувальних операціях. Проте не розглянуто вплив сучасних технологій та автоматизації, а також недостатньо висвітлено практичні аспекти впровадження запропонованих методів у реальних умовах.

У статті [36] досліджено переміщення контейнерів і транспортних засобів між терміналами в портовій зоні для інтегрованого транспорту як всередині порту, так і до внутрішніх територій. Контейнери переміщують із портових терміналів на залізничний двір і далі до внутрішніх районів. У статті запропоновано оптимізаційну модель для покращення доставлення контейнерів, ураховуючи залізничний транспорт і обробку вантажів на терміналах. Модель тестована на реальній портовій мережі і використовує ковзний горизонт для підвищення обчислювальної ефективності за великого транспортного попиту. Результати показують, що більше сполучень між терміналами та гнучкий розклад відправлень поїздів можуть покращити інтегровану продуктивність перевезень. Стаття має значення для висвітлення теми невизначеності та ризику, оскільки підкреслює важливість ефективного управління у складних умовах. Недоліками є ігнорування сучасних технологій і автоматизації, а також недостатній розгляд практичних аспектів впровадження методів у реальних умовах.

2.6 Аналіз наукових досліджень, присвячених нівелюванню впливу факторів невизначеності та ризику, пов'язаних зі структурними змінами і стратегічними або проєктними рішеннями, які безпосередньо впливають на експлуатаційну роботу

Наукові дослідження, спрямовані на вирішення проблем, пов'язаних зі структурними змінами і стратегічним плануванням і проєктуванням у сфері управління залізничними транспортними системами, підкреслюють важливість оптимізації та ефективного впровадження нововведень, відзначають фактори невизначеності та ризику, які впливають на процес ухвалення рішень і реалізації стратегій управління.

В анотованому бібліографічному огляді [37] зібрано та класифіковано літературу з аналітичних моделей для залізничних систем, зокрема мереж, маневрових дільниць і розкладів. Основну увагу приділено симуляційним і оптимізаційним моделям з акцентом на останні. Огляд має на меті сприяти розвитку планування в залізничному транспорті та заохочувати дослідників до вивчення цієї сфери моделювання. Позитивні аспекти включають глибокий аналіз і широкий спектр моделей, що допомагає зрозуміти складні аспекти оптимізації в умовах невизначеності та ризику. Недоліки - можливі обмеження експериментальних даних і застарілість математичних апаратів, що може ускладнити адаптацію моделей до сучасних умов.

У статті [38] проаналізовано два інноваційні проєкти British Rail: Advanced Passenger Train і High Speed Train, які мають різні результати. Перший проєкт успішно завершено, тоді як другий, що триває довше, стикається з технічними проблемами. Основну увагу приділено впливу невизначеності на результати проєктів. Зазначено, що управління невизначеністю є основним для успішного завершення проєктів, а гнучкість у підході може допомогти впоратися з невизначеністю, залежить від організаційних аспектів і характеристик самих проєктів. Однак стаття має певні недоліки: недостатньо детально описано конкретні

методи або інструменти для управління невизначеністю, а також не розглянуто фінансові та часові ризики проєктів. Загалом стаття дає цінний аналіз впливу невизначеності на проєкти і важливість гнучкого управління, що є корисним для дослідників і практиків у сфері управління проєктами.

У статті [39] розглянуто ухвалення рішень про обслуговування та оновлення залізничної інфраструктури, акцентуючи увагу на невизначеності та ризики. Підкреслено важливість оцінювання витрат життєвого циклу (англ. LCC) з ухваленням рішень і пропоновано використовувати інструменти підтримки рішень, такі як оцінка LCC. Основну увагу приділено переходу від якісного до кількісного аналізу за допомогою стохастичних методів і моделювання Монте-Карло, що дає змогу врахувати невизначеність у параметрах надійності та ремонтпридатності (англ. R&M). У статті детально проаналізовано, як невизначеність у параметрах R&M може впливати на ухвалення рішень про обслуговування, і показано гнучкість моделі, яка підтримує великі набори даних і реальні умови управління обслуговуванням. Проте не розглянуто інтеграцію різних типів ризиків у моделювання і не надано конкретних рекомендацій про практичне впровадження моделі в реальні системи управління залізничною інфраструктурою.

У статті [40] проаналізовано ефективність залізничного вантажного транспорту після приватизації, зазначаючи про недостатню увагу до цього сектору на фоні більших обговорень пасажирських перевезень. Хоча оператори, регулятори та уряди називали вантажні перевезення «історією успіху» і висували амбітні цілі зростання, реальні показники виявилися значно нижчими за очікувані. Автори відзначають розчарування в досягнутій ефективності та ставлять під сумнів реалістичність прогнозованих темпів зростання. Розглянуто проблеми, пов'язані з переоціненими прогнозами та невизначеністю у плануванні й управлінні, підкреслюючи економічні ризики та зниження довіри до залізничного транспорту як надійного засобу перевезення вантажів. Переваги — усебічний аналіз ефективності після приватизації та критичне ставлення до нереалістичних цілей зростання. Автори наводять аргументи і дані, що ставлять під сумнів досягнення раніше заявлених результатів. Недоліки - відсутність конкретних рекомендацій щодо

вирішення виявлених проблем і недостатній аналіз причин, чому прогнозовані показники не були досягнуті.

2.7 Аналіз наукових статей, присвячених вирішенню проблем контролю за факторами невизначеності та ризику, що виникають у логістичних системах, які використовують залізничний транспорт

Вивчення наукових статей, присвячених проблемам логістичних систем, які використовують залізничний транспорт для здійснення доставлення вантажів, підкреслює важливість розуміння та управління факторами невизначеності та ризику. Ці аспекти визначають складність управління та потребують розроблення ефективних стратегій і методів для забезпечення надійності та оптимальності логістичних процесів.

У статті [41] розглянуто проектування мереж постачання і реверсивної логістики в умовах невизначеності, акцентуючи увагу на планувальних рішеннях та оптимізаційних техніках, таких як стохастичне програмування та робастна оптимізація. Детально проаналізовано методи, що дають змогу враховувати ризики і невизначеність, і зазначено про важливість адаптації мереж до змін. Переваги - всебічний огляд методів і акцент на довгострокові зміни. Недоліки - недостатнє висвітлення нових методів і відсутність інтеграції різних підходів у єдину модель. Ця стаття - цінний ресурсом для управлінців з ланцюгів постачання, для яких пропоновано перспективні напрями для подальших досліджень.

У статті [42] запропоновано модель вимірювання стійкої екологічної продуктивності ланцюгів постачання на основі Multi-Regional Input–Output аналізу. Досліджено викиди вуглецю в металургійній промисловості країн BRICS, акцентуючи увагу на впливі попиту, технологічного прогресу та економічного зростання. Запропоновано стратегії для зменшення екологічного

відбитку(екологічної шкоди?), але (це?) може бути обмежена(о) через відсутність стандартизації методологій, що вплине на точність вимірювань.

2.8 Аналіз наукових розробок, присвячених проблемам зменшення рівня ризику, пов'язаного з перевезеннями небезпечних вантажів залізничним транспортом

Наукові дослідження, що розглядають проблеми, пов'язані з ризиками, завжди присутні за здійснення перевезень небезпечних вантажів залізничним транспортом, зосереджені на визначенні та управлінні ризиковими ситуаціями, які виникають у процесі логістики та експлуатації. Аналіз таких наукових розробок дає змогу ідентифікувати основні аспекти і вдосконалювати стратегії управління, спрямовані на забезпечення безпеки та ефективності перевезень небезпечних вантажів.

У статті [43] розглянуто розроблення математичної моделі для оперативного планування роботи залізничних станцій, що обробляють небезпечні вантажі. Модель намагається мінімізувати експлуатаційні витрати і технологічні ризики через цільову функцію, яка включає всі основні операції на станції. Використовуючи метод багатоцільової оптимізації на базі генетичних алгоритмів. Випробування показали, що нова модель на 6,5 % ефективніша за витратами та на 8 % краща за експозицією ризику порівняно з традиційними методами. Переваги - детальний підхід до управління в умовах ризику, недоліки - неврахування кліматичних умов і людських помилок, потреба в довгостроковій валідації моделі.

У статті [44] запропоновано метод оцінювання наслідків надзвичайних ситуацій за перевезення небезпечних вантажів залізницею. Використано інтегрований критерій, що враховує ймовірність серйозних наслідків на основі розміщення вагонів із небезпечними вантажами в поїзді. Критерій оцінено через нечітку логіку, яка дає змогу враховувати змінні фактори ризику. Моделювання показало, що параметри відповідно описують імовірність наслідків надзвичайних

ситуацій, хоча результати є сумнівними. Недоліки - відсутність прикладів практичного застосування та недостатня обґрунтованість моделі в реальних умовах.

2.9 Науковий внесок і перспективи подальших досліджень

Під час аналізу виявлено, що сфера управління експлуатаційною роботою в системах залізничних перевезень відзначена високим рівнем складності та взаємозалежності, що робить її вразливою до факторів невизначеності і ризику. Дослідження в цій галузі є вкрай важливими для забезпечення надійності та ефективності перевезень. У цьому контексті значний внесок зробили як українські, так і зарубіжні науковці. Зокрема, найбільш вагомими результатами для розроблення методів і моделей, що оперують факторами невизначеності і ризику, отримали Бутко Т. В., Жуковицький І. В., Кириченко Г. І., Колісник А. В., Коскіна Ю. О., Панченко С. В., Прохоров В. М., Прохорченко А. В., Чехунов Д. М., Altazin E., Bešinović N., Cacciabue P. C., Caprara A., Chen Chunyang, Dimitrov P., Ghofrani F., Govindan K., Guo C., Huang Y., Khalil A., McCartney S., Ren J., Shuib A., Zhang Q.

Підсумовуючи проведений аналіз літератури, можна виділити кілька загальних моментів і трендів. Одним із основних висновків є те, що дослідження у сфері управління експлуатаційною роботою залізничного транспорту активно розвиваються, незважаючи на складність і багатогранність цієї теми. Зростає інтерес до моделей, які враховують індетермінованості та контингентності перевізного процесу, що свідчить про прагнення наукової спільноти створювати більш адаптивні та реалістичні рішення для залізничних систем.

Серед позитивних моментів можна відзначити розвиток симуляційних і оптимізаційних моделей, що дає змогу дослідникам комплексно підходити до вирішення проблем залізничного транспорту. Значний прогрес спостерігають у використанні сучасних інформаційних технологій і математичних моделей, що забезпечує ефективну автоматизацію процесів управління.

Однак аналіз також виявив деякі часті недоліки досліджень. Одним із найбільш помітних є відсутність єдиних усталених підходів для оперування поняттями невизначеності та ризику. Це може призводити до непослідовності в результатах і методах вирішення проблем. Крім того, обмеження експериментальних даних і використання застарілих математичних апаратів іноді обмежують точність і практичну цінність отриманих результатів.

Перспективи подальших досліджень включають розроблення нових підходів для зменшення впливу індетермінованості та контингентності на залізничні системи, а також інтеграцію передових інформаційних технологій для автоматизації управлінських процесів. Це може включати створення більш комплексних моделей, що враховують різні фактори та невизначеності, а також розвиток методів машинного навчання і штучного інтелекту для аналізу великих даних і ухвалення рішень у реальному часі.

Однак найважливіший висновок, який випливає з цього аналізу, полягає в такому: головною характеристикою сучасних підходів контролю над факторами невизначеності та ризику у сфері управління експлуатаційною роботою залізничного транспорту все ж таки має бути не тільки широке використання новітніх математичних апаратів і методів оптимізації для вирішення відомих завдань за стандартних умов, а й зміна самих умов і переформулювання самих цих завдань так, щоб їх рішення були досить гнучкими, адаптивними і здатними ефективно долати проблеми індетермінованості та контингентності перевізного процесу.

2.10 Висновки до другого розділу

Аналіз наукових статей, присвячених управлінню залізничними системами, демонструє важливість та актуальність досліджень у цій сфері. Проблема невизначеності та ризиків в управлінні залізничними системами є надзвичайно

значущою, оскільки безпосередньо впливає на ефективність, безпеку та надійність транспортних операцій. Складність цієї тематики обумовлена необхідністю врахування численних факторів, таких як технічні обмеження, людський фактор, погодні умови та інші непередбачувані обставини, які можуть вплинути на результати управлінських рішень.

За останнє десятиліття інтерес до цієї проблеми не тільки не зменшився, а й зріс. Це пояснюється як розвитком технологій, що дають змогу проводити більш точні моделювання та аналіз, так і зростанням вимог щодо надійності та безпеки залізничних перевезень у глобальному контексті. Вітчизняні та зарубіжні дослідники активно розробляють нові методи та підходи для вирішення проблем, пов'язаних із невизначеністю і ризиками в залізничних системах, що свідчить про постійну актуальність і важливість цієї теми.

Аналіз різних підходів для дослідження невизначеності та ризиків у залізничних системах показує широкий спектр методів і моделей, використовуваних для вирішення цих проблем. Значна частина наукових робіт зосереджена на розробленні математичних моделей, що дають змогу враховувати різні фактори невизначеності, такі як випадкові збої, варіації в пасажиропотоці, погодні умови та інші непередбачувані обставини. Серед використовуваних методів слід відзначити оптимізацію, зокрема змішане цілочислове лінійне програмування, імітаційне моделювання, а також евристичні та метаетвристичні алгоритми.

Одним із головних аспектів, розглянутих у дослідженнях, є інтеграція ГРП і оптимізація певних оперативних завдань, щоб зменшити простої рухомого складу, підвищити пропускну та переробну спроможність станцій і, отже, підвищити загальну ефективність функціонування залізничної системи. Також важливим є врахування операційних обмежень, таких як обмеження на обслуговування колій під час ТО, які впливають на технологічні процеси функціонування залізничних підрозділів. Використання сучасних методів, зокрема метаетвристичних алгоритмів, дає змогу досягати оптимальних або близьких до оптимальних рішень, що враховують множинні критерії та обмеження.

Аналіз даних, проведений у реальних умовах, показує певну ефективність запропонованих моделей і методів. Наприклад, результати досліджень демонструють, що впровадження гнучкої спеціалізації колій і адаптивного планування ГРП дає змогу значно зменшити затримки та кількість скасованих поїздів. Такі підходи підвищують надійність і ефективність залізничних перевезень, що є важливим для підтримання конкурентоспроможності залізничних систем у сучасних умовах.

Застосування моделей і алгоритмів, здатних генерувати управлінські рішення в реальних умовах, - це важливий етап для перевірки їхньої ефективності та практичної цінності. Аналіз результатів показує, що більшість запропонованих методів успішно справляються з завданнями оптимізації залізничних операцій в умовах невизначеностей і ризиків. Наприклад, моделі інтегрованого планування зупинок і ГРП дають змогу одночасно зменшити час очікування пасажирів, затримки поїздів і час їхнього руху.

Крім того, компетентне з застосуванням відомих аналітичних і квазікласичних методів, таких як методи релаксації Лагранжа та модифіковані методи множників, можна знаходити більш точні та ефективні рішення у стислі строки. Наприклад, метод альтернативного напрямку множників (англ. ADMM) для корегування розкладу руху поїздів і повторного маршрутування показав, що він забезпечує більш точні результати і потребує менше ітерацій порівняно з іншими методами.

Дані, отримані з китайської високошвидкісної залізничної мережі, підтверджують, що гнучка політика використання колій забезпечує кращі результати порівняно з фіксованою політикою напрямків. Це підтверджує, що адаптивне управління ресурсами та гнучке планування можуть значно покращити функціонування залізничних систем в умовах невизначеності та ризику, зменшуючи кількість скасованих поїздів і загальні затримки.

Отже, результати досліджень підтверджують ефективність розроблених моделей і методів для покращення залізничних операцій у реальних умовах, забезпечуючи надійність і ефективність транспортних систем.

Особливо важливо виділити можливості для подальшого вдосконалення режиму доступу до глобальних мереж логістичного забезпечення, зокрема портах. Аналіз статей, присвячених цій проблематиці, вказує на необхідність удосконалення координації між терміналами, розкладом руху поїздів і використанням інфраструктури. Розширення мереж зв'язків між терміналами і гнучкість ГРП сприятиме покращенню інтегрованого транспортного обслуговування контейнерів. Використання рухомого горизонту планування в оптимізаційних підходах є важливим кроком для поліпшення обчислювальної ефективності за великих обсягів транспортних запитів.

Дослідження підтверджують, що моделі та методи оптимізації, розроблені для вирішення проблем управління транспортними системами, є цінним інструментом для індустрії. Проте необхідно також звертати увагу на питання інфраструктурної готовності та потребу у вдосконаленні технічного обладнання для досягнення максимальної ефективності управління.

Обговорюючи загальні недоліки розглянутих результатів досліджень, слід зазначити про відсутність єдиної та універсальної методології або підходу для управління ризиками та невизначеністю. Більшість досліджень надають свої унікальні моделі та методи, що ускладнює порівняння і адаптацію результатів для конкретних виробничих умов. Крім того, деякі дослідження не враховують достатньо великий спектр випадкових факторів, таких як сезонність, зміни в пасажирському попиті або технічні збої.

Ще одним важливим аспектом є необхідність вдосконалення використовуваних математичних моделей для кращого врахування динамічних змін у середовищі. Більшість сучасних моделей мають обмеження у прогнозуванні та адаптації до швидко змінюваних умов ринку і технічних обмежень. Неусвідомлене або неповне врахування цих факторів може призвести до обмеженого застосування результатів досліджень у практичному виробництві, що підкреслює потребу в подальших дослідженнях для створення більш комплексних та універсальних підходів для управління ризиками і невизначеністю в залізничній галузі.

Також слід зазначити, що обмеження у сфері досліджень з управління експлуатаційною діяльністю залізничних систем можуть бути подолані шляхом інтеграції сучасних технологій, таких як Інтернет речей (англ. IoT) і аналітика великих даних (Big Data), що може суттєво покращити точність прогнозування та ухвалення рішень у реальному часі. Інтеграція нових технологій у процеси управління може дати нові можливості для удосконалення стратегій і підходів для забезпечення надійності та ефективності залізничних перевезень.

Отже, для подальшого розвитку теорії та практики управління залізничними системами в умовах невизначеності та ризиків важливо не лише застосовувати новітні методи оптимізації, але й забезпечити їх адаптацію до конкретних умов функціонування системи. Потреба в інтеграції сучасних технологій і підходів є необхідною для досягнення високих результатів у сфері управління залізничним транспортом і підвищення його конкурентоспроможності в умовах сучасного ринку.

РОЗДІЛ 3

УМОВИ ЗДІЙСНЕННЯ ЗАЛІЗНИЧНИХ ПЕРЕВЕЗЕНЬ ЗА РЕЗУЛЬТАТАМИ
СТАТИСТИЧНОГО АНАЛІЗУ ПОКАЗНИКІВ У КОНТЕКСТІ УПРАВЛІННЯ
ЕКСПЛУАТАЦІЙНОЮ РОБОТОЮ

3.1 Аналіз показників роботи залізничного транспорту України

Залізничний транспорт є стратегічно важливим елементом інфраструктури країни, що забезпечує не лише перевезення пасажирів і вантажів, а й є основою для економічного розвитку та соціальної стабільності. В умовах сучасного світу залізничний транспорт відіграє головну роль у зменшенні транспортних заторів, зниженні викидів CO₂ та інших забруднювачів, а також забезпеченні доступу до віддалених територій. Залізничним транспортом в Україні здійснюють більше половини загального обсягу перевезень [45] (рисунок 3.1).

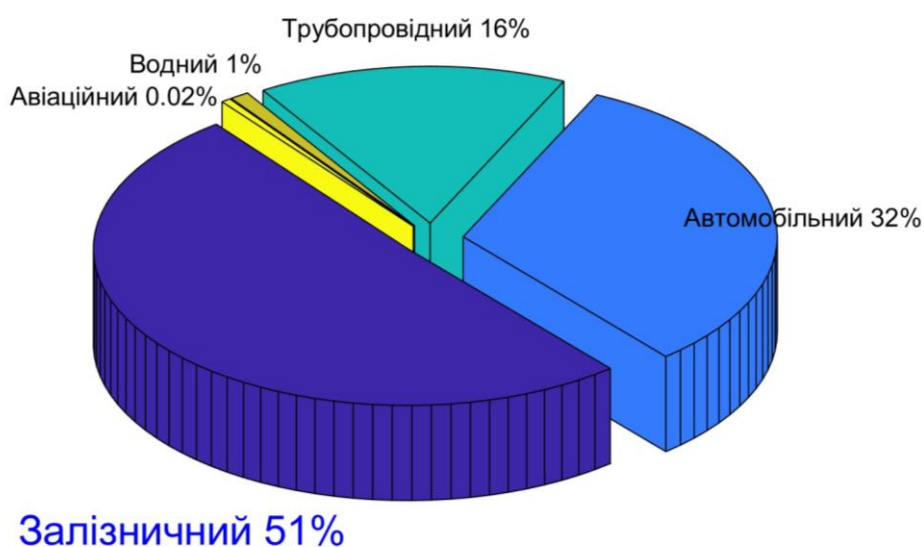


Рисунок 3.1 – Розподіл обсягів перевезень за видами транспорту

Ефективне функціонування залізничної системи потребує системного аналізу показників її експлуатаційної діяльності. Сучасна система показників, використовуваних на АТ «Укрзалізниця», виділяє кількісні і якісні показники.

Ефективність функціонування залізничного транспорту України є одним із основних факторів забезпечення стабільності національної економіки та її інтеграції до світових господарських процесів.

Аналіз показників експлуатаційної роботи залізничної системи дає змогу оцінити ступінь виконання поставлених перед галуззю завдань, а також виявити резерви для підвищення якості та надійності залізничних перевезень. Одними з найважливіших кількісних показників роботи залізничного транспорту є динаміка обсягів перевезених вантажів і тонно-кілометрів (рисунок 3.2), чисельності перевезених пасажирів і пасажиро-кілометрів.

Усі ці залежності демонструють негативні тенденції зниження обсягів перевезень, які були лише значно загострені воєнними діями, але зародилися набагато раніше.

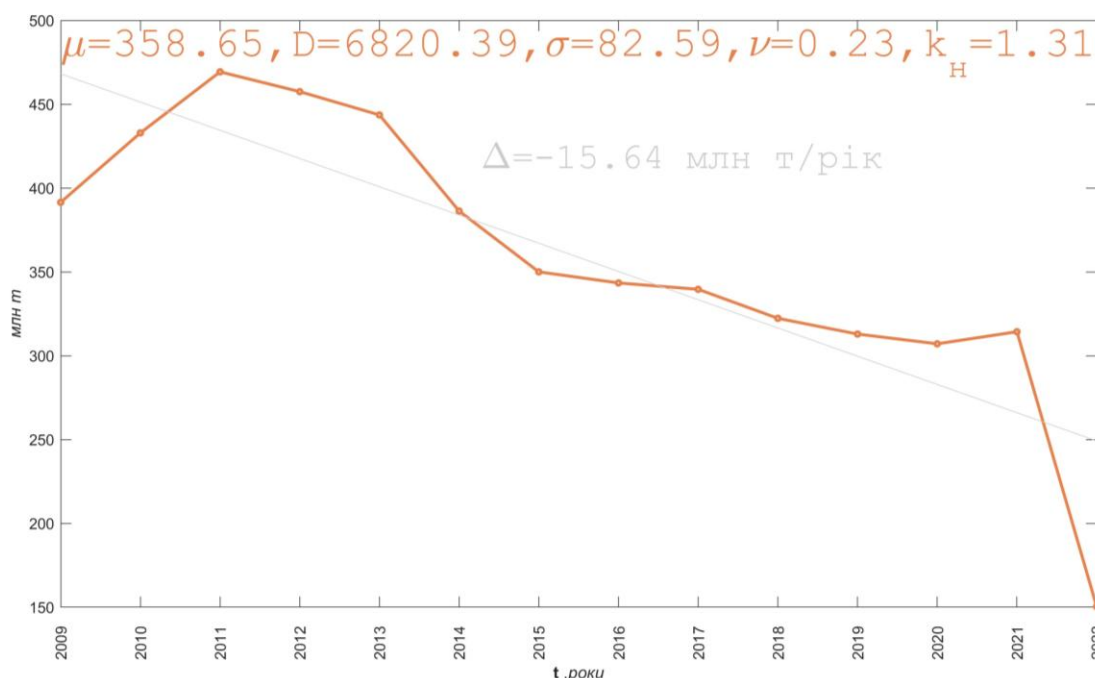


Рисунок 3.2 – Річна динаміка обсягів вантажних перевезень залізничним транспортом

На рисунку В.1 (додаток В) наведена річна динаміка вантажообігу залізничного транспорту в Україні, яка теж демонструє сталу негативну динаміку.

Однак пасажирські залізничні перевезення майже у всьому світі є дотаційними і не становлять основу фінансової стабільності залізничної системи. Натомість вантажні залізничні перевезення є основним джерелом прибутку залізничного транспорту, і падіння доходів внаслідок падіння попиту на залізничні перевезення звужує і так невеликі можливості залізничних підприємств з оновлення інфраструктури та рухомого складу, що підтверджує, зокрема, і негативна динаміка чисельності маневрових локомотивів (рисунок 3.3).

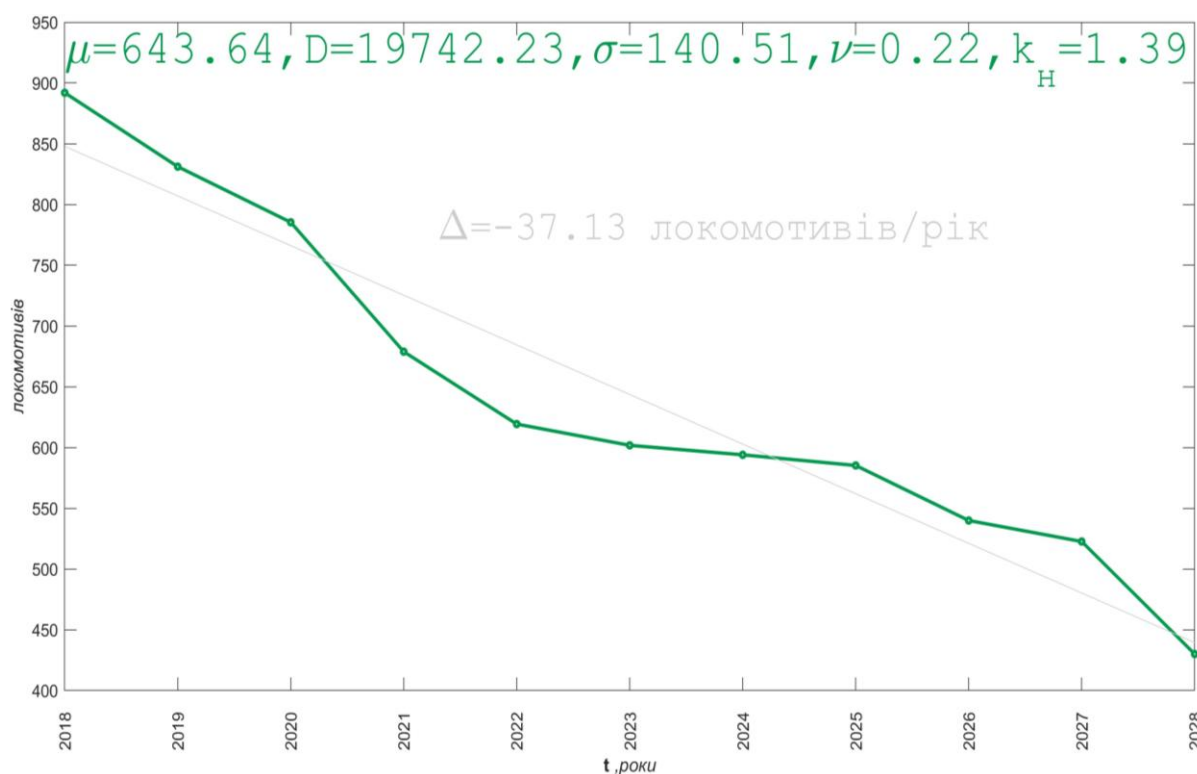


Рисунок 3.3 – Річна динаміка чисельності маневрових локомотивів

Ще одним негативним аспектом зниження прибутків АТ «Укрзалізниця» є значне зменшення можливості фінансування програм з розроблення нових концепцій розвитку і управління на залізничному транспорті. А цей напрям модернізації галузі залізничних перевезень є не менш капіталомістким, аніж напрям

матеріального оновлення, однак він є не менше, а скоріше ще більш важливим за нього.

Нагativна динаміка вантажообігу з переміщення порожніх вагонів (рисунок 3.4) також підтверджує висновок про те, що оновлення концепцій і моделей управління є важливішим за оновлення, наприклад, рухомого складу та збільшення парку вантажних вагонів, адже останніми роками здійснювалися певні закупівлі вантажних вагонів, а також значно був поповнений парк приватних вагонів.

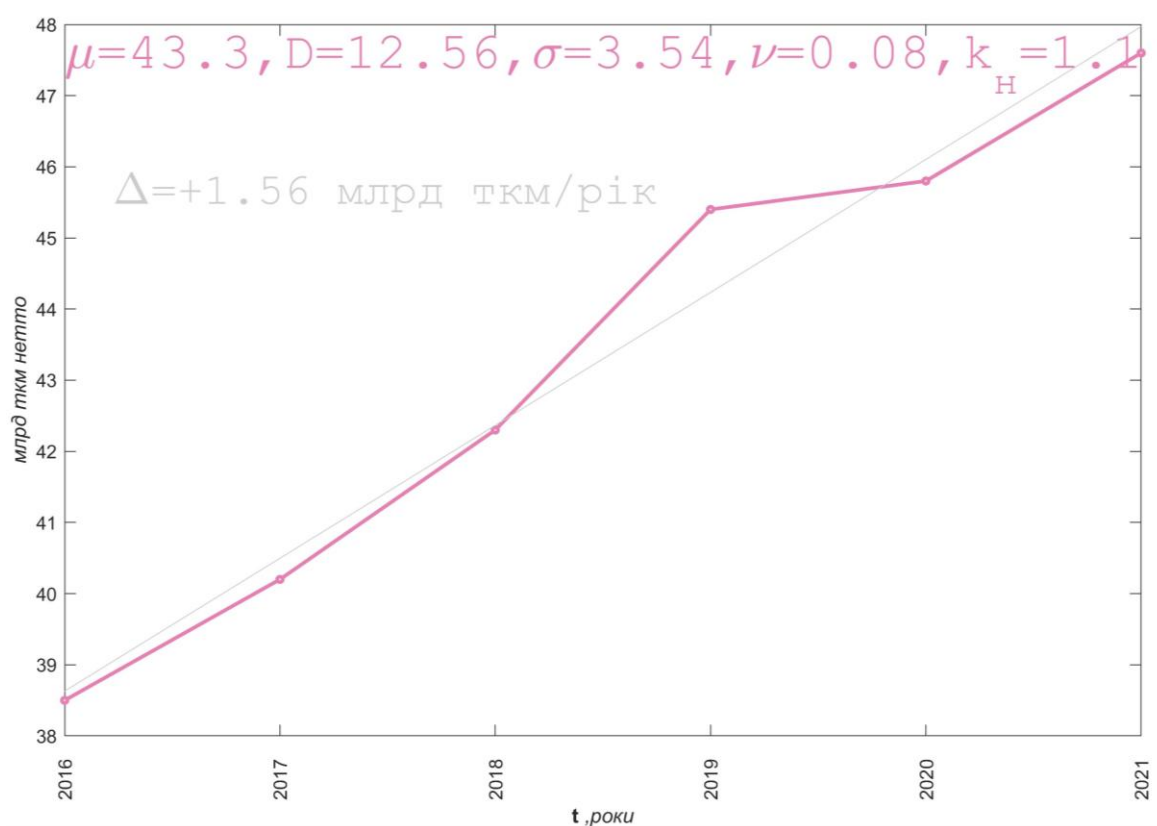


Рисунок 3.4 – Річна динаміка вантажообігу з переміщення порожніх вагонів

Однак, незважаючи на це, динаміка на рисунку 3.4 свідчить про щорічне збільшення порожнього пробігу вагонів більш ніж на 1,5 млрд ткм. Цей факт свідчить про те, що досі не розроблено моделі і механізми управління ТС в умовах, коли частка приватних вагонів може становити, наприклад, 50 % і навіть більше.

При цьому ефективність традиційних технологій управління за таких умов різко знижується.

Не лише кількісні, але й якісні показники свідчать про значні проблеми в галузі управління експлуатаційною роботою залізничного транспорту. Динаміка середньої тривалості обігу вантажного вагона (рисунок 3.5) уже не перше десятиріччя демонструє негативний тренд.

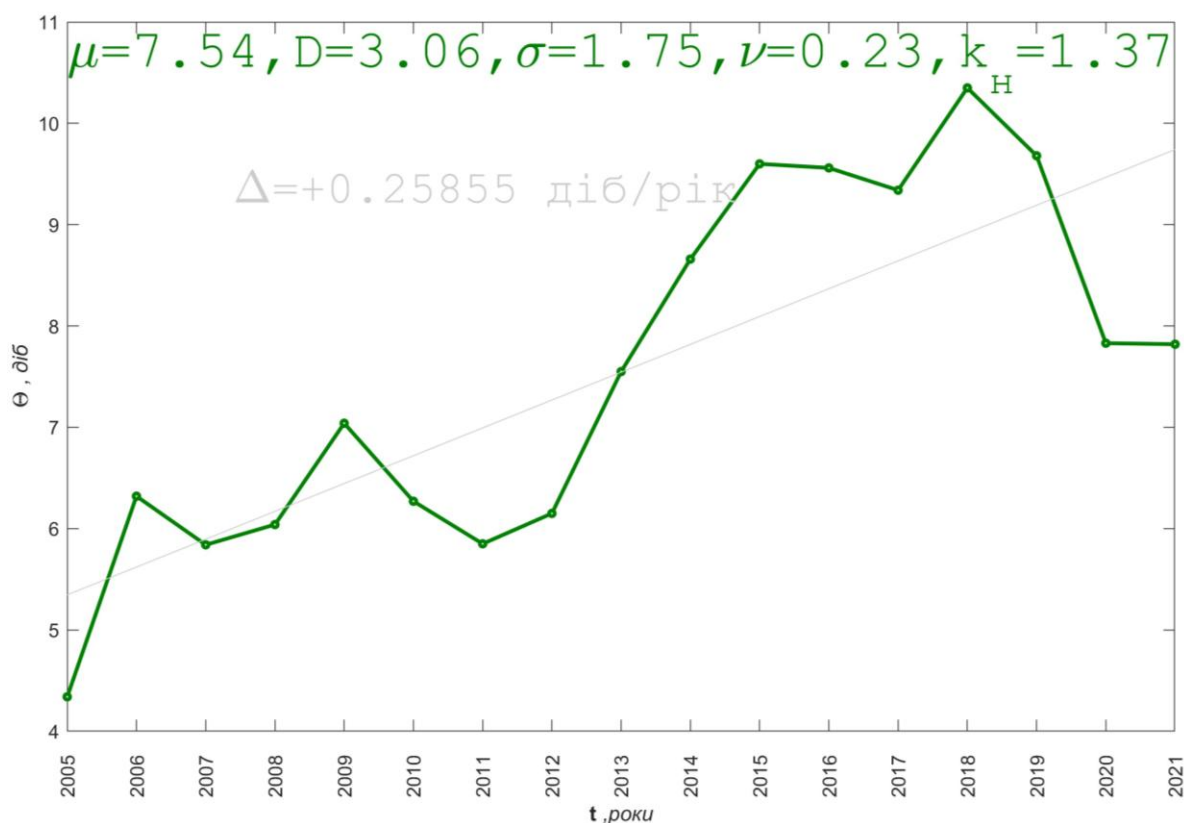


Рисунок 3.5 – Річна динаміка середньої тривалості обігу вантажного вагона

Величина обігу на початку 2000-х років становила лише трохи більше чотирьох діб, а тепер навіть до повномасштабної агресії вже становила близько восьми діб, в окремі роки навіть перевищувала значення 10 діб. До того ж збільшення середньої величини обігу вантажного вагона відбувалося навіть на тлі анексії росією значної території України, тобто зменшення підконтрольної території і відповідно зменшення середньої відстані перевезень. Це знову ж таки свідчить про те, що не єдиною, але головною причиною багатьох негативних тенденцій на

залізничному транспорті є затримка розвитку технологій управління експлуатаційною роботою порівняно з тими змінами, які відбулися протягом минулих десятиріч, і тими викликами, які постали перед залізничною системою України останніми роками.

Крім того, збільшення середньої тривалості обігу вантажного вагона є тригером для цілої низки негативних явищ. Унаслідок збільшення тривалості обігу вагона виникає дефіцит вагонів, доступних для здійснення перевезень. Це запускає ринковий механізм підвищення ставок на оренду вагонів, адже визначення орендарів відбувається за допомогою аукціону. На рисунку 3.6 наведена місячна динаміка середньої тривалості обігу напіввагона на полігоні АТ «Укрзалізниця» протягом 2021 року та відповідна динаміка ринкових добових ставок на оренду напіввагона.

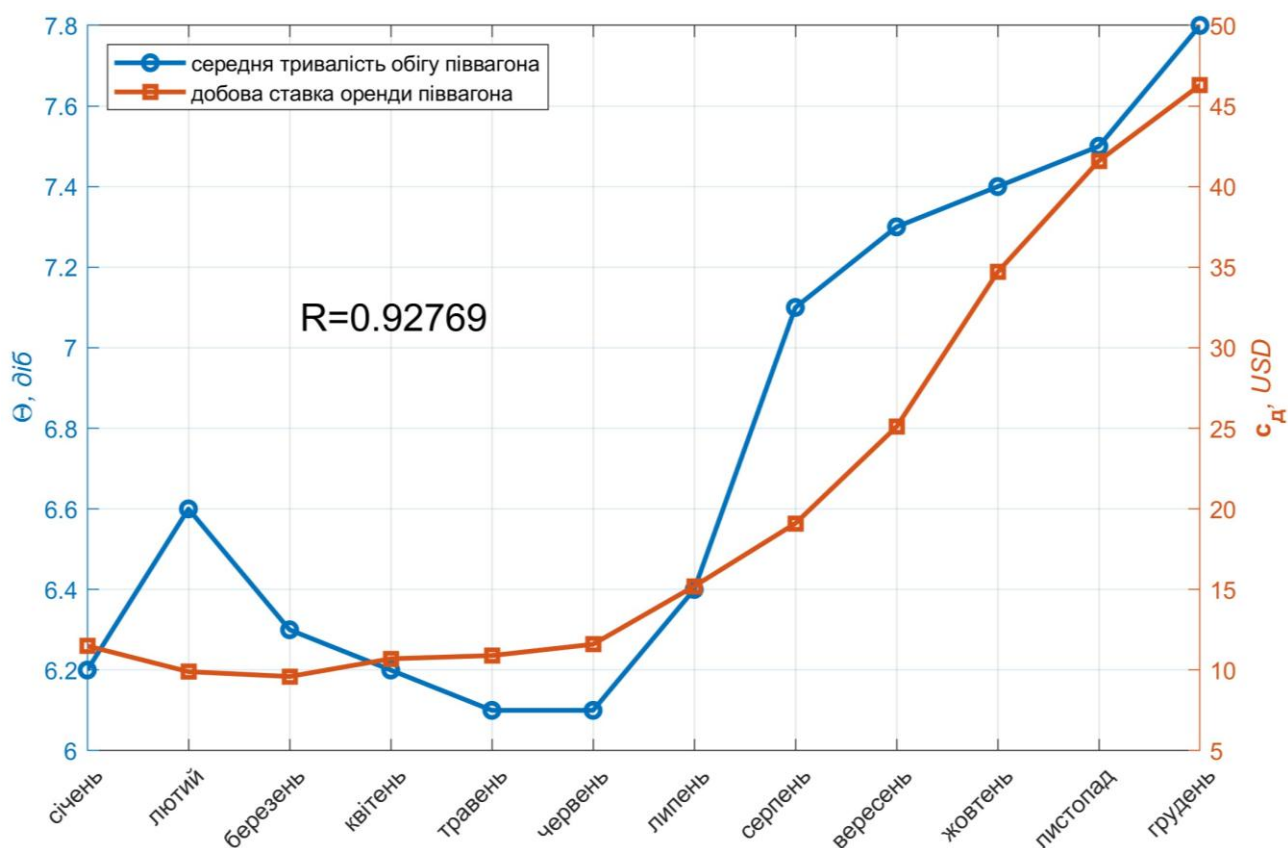


Рисунок 3.6 – Місячна динаміка середньої тривалості обігу напіввагона і середньої величини добової ставки оренди напіввагона

Отже, підвищення середньої тривалості обігу напіввагона на дві доби протягом року спровокувало підняття середньої добової орендної ставки на оренду напіввагона з 11,5 на початку року до 46,3 дол. США наприкінці року.

Причинно-наслідковий зв'язок між цими явищами підтверджено і коефіцієнтом кореляції між цими двома часовими рядами - $R = 0,92769$. Таке значне підвищення орендних ставок змушує вантажовідправників переходити на інші види транспорту і насамперед автомобільний транспорт. Отже, цей окремий приклад наочно демонструє той факт, що погіршення показників експлуатаційної роботи має прямий негативний вплив на довіру клієнтів і конкурентоспроможність залізничного транспорту.

Цей приклад підтверджує той факт, що процес залізничних перевезень, який відбувається в ринковому середовищі, не кажучи вже про фактор війни, відчуває на собі на порядок більше факторів невизначеності і ризику (у тому числі економічної природи) порівняно з доринковим середовищем, за якого були сформовані технології управління експлуатаційною роботою і досі використовувані на полігоні АТ «Укрзалізниця». Отже, вітчується помітний дисонанс між непередбачуваним середовищем і застарілими управлінськими технологіями.

Той факт, що невизначеності та ризику є невід'ємними рисами перевізного процесу на залізниці України і обумовлені не лише зовнішніми факторами ринкового економічного середовища, можна продемонструвати на такому прикладі. Графік динаміки виплати штрафів за несвоєчасне доставлення вантажів і порожніх вагонів (рисунок 3.7) демонструє значне зростання штрафних виплат компанією АТ «Укрзалізниця» з 2018 по 2022 рік.

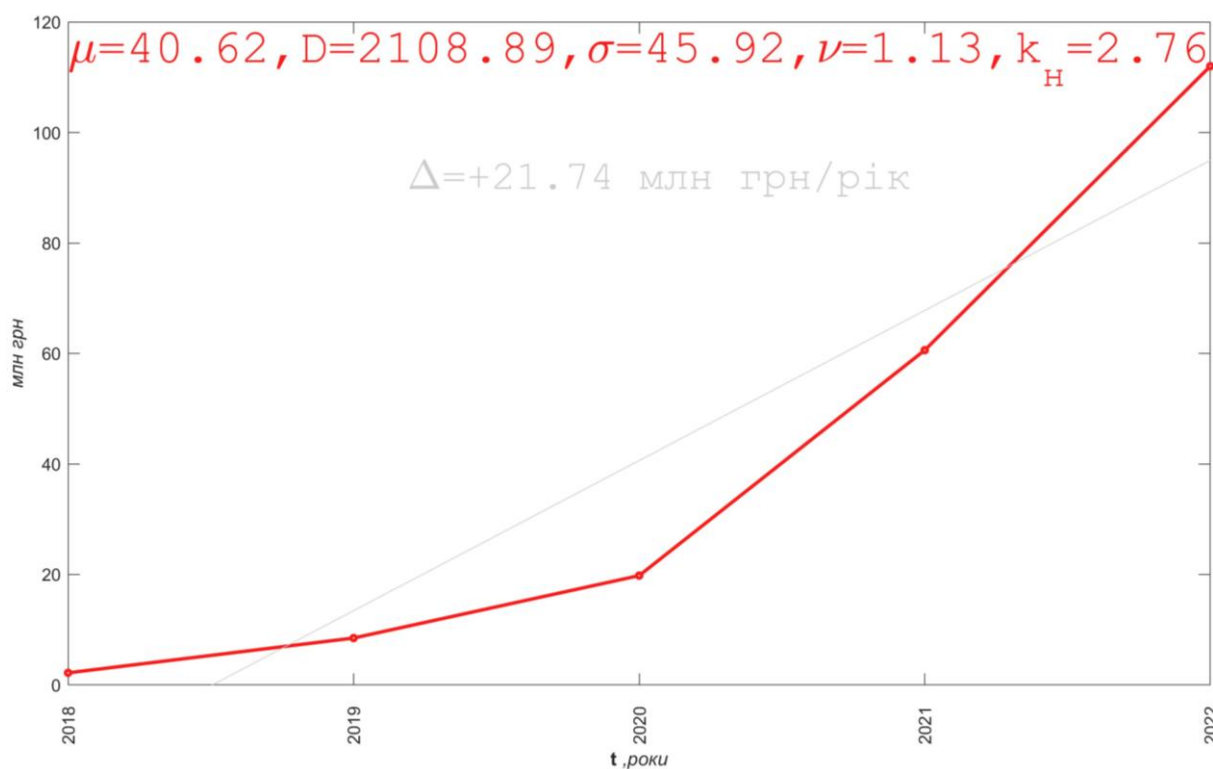


Рисунок 3.7 – Річна динаміка виплати штрафів за несвоєчасне доставлення вантажів і порожніх вагонів

У 2018 році загальна сума штрафів становила 2,2 млн грн, тоді як у 2022 році цей показник зріс до 112 млн грн. Отже, подана залежність демонструє стрімко зростаючий графік. Навіть якщо цю залежність апроксимувати лінійним трендом, то навіть у такому випадку він вказує на щорічне збільшення штрафних виплат на 21,74 млн грн. Тож ця залежність розкриває серйозну проблему, що постійно тільки загострюється. Отже, це комплексна проблема, яка є результатом впливу цілого набору факторів. Однак, з точки зору теорії управління, фактично ці виплати являють собою сумарний реалізований ризик, який не був елімінований, а можливо, і своєчасно ідентифікований управлінською ланкою під час управління експлуатаційною роботою. Виходячи з цього і вирішувати таку проблему необхідно релевантними засобами, а саме за допомогою застосування в управлінні методів і моделей ризик-менеджменту.

Очевидним є той факт, що не лише проблема штрафів, але й значна частка всієї множини проблем, з якими стикаються залізничні підприємства, є результатом управлінських технологій, які недостатньо точно або не зовсім адекватно

взаємодіють із факторами невизначеності та ризику, а деякі з наявних моделей і технологій управління експлуатаційною роботою взагалі не оперують такими поняттями.

Виходячи з цього, доцільно дослідити, наскільки дані, якими система АСК УЗ Є забезпечує підсистему управління експлуатаційною роботою, відповідають застосовуваним технологіям їх обробки.

3.2 Аналіз варіативності параметрів експлуатаційної роботи на прикладі даних добового вагонопотоку певного призначення сортувальної станції

Як було зазначено вище, проблеми погіршення кількісних і якісних показників на залізничному транспорті України значною мірою пов'язані із застарілими методами управління експлуатаційною роботою. Однак, окрім недоліків, пов'язаних із використанням застарілих методів управління та недостатнім рівнем його автоматизації, є також проблема, що саме значно ускладнює цифровізацію та автоматизацію управлінського процесу. Суттєвим негативним фактором у сфері управління експлуатаційною роботою є нібито існування стійкого фону невизначеності як системного явища, який, здається, лише посилюється останнім часом, навіть незважаючи на постійний розвиток інформаційних технологій. Скоріше за все це пов'язано з особливою специфікою перевізних процесів і технологій ухвалення рішень у сфері УЕР, які потребують особливих підходів. Звісно, помітну частку цього фону невизначеності становить і стохастична складова, притаманна процесу залізничних перевезень, як вантажних, так і пасажирських. Особливо гострою ця проблема є саме у сфері оперативного і тактичного управління, коли час на ухвалення рішень є вкрай обмеженим. Ця проблема частково полягає в тому, що практично неможливо спрогнозувати за допомогою класичних методів вихідні дані, потрібні для побудови оперативних планів навіть за наявності достатньо великих обсягів історичної інформації.

Розглянемо для прикладу історичні дані, що є певним параметром роботи СС. СС щоденно формує поїзди одночасно за багатьма напрямками, їх може бути декілька десятків. Кількість поїздів, сформованих за кожним напрямком, залежить від величини вагонопотоку з вагонів цього напрямку, який надійде до станції за добу. Розглянемо історичні дані, які отримані на сортувальній станції Д і є значенням величини добового вагонопотоку одного з багатьох напрямків, на які вона формує вантажні поїзди. Цей вагонопотік надходить до СС у складі вантажних поїздів, що прибувають у розформування. Цей набір даних містить 107 елементів і являє собою фактичні значення величини добового вагонопотоку за 107 послідовних днів (дані наведені в таблиці Е.1, додаток Е). Такий впорядкований за параметром часу набір даних має назву часового ряду. Головна мета дослідження - з'ясувати, наскільки ці дані є волатильними, а часовий ряд прогнозованим. Перший етап дослідження часового ряду – ідентифікація – це процес визначення структури та властивостей часового ряду на основі доступних даних. На рисунку 3.8 подано часовий ряд і його первинні статистичні показники, виявлені під час ідентифікації.

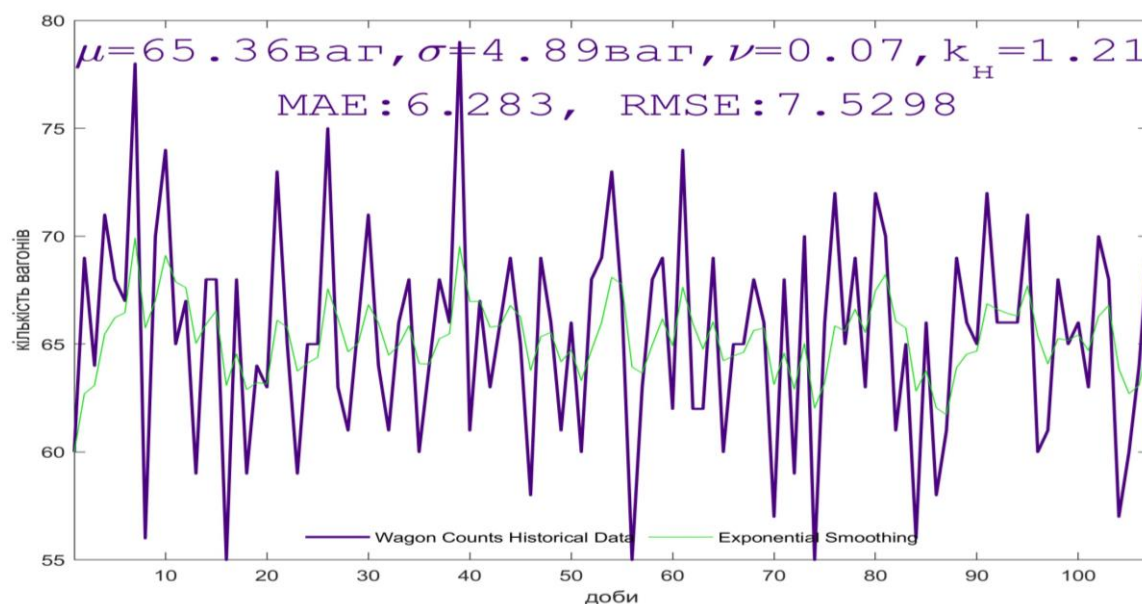


Рисунок 3.8 – Часовий ряд добового вагонопотоку та його основні статистичні характеристики, а також апроксимація за допомогою методу експоненційного згладжування

Математичне сподівання цього ряду становило 65,4 вагона за середньоквадратичного відхилення лише 4,9 вагона. Коефіцієнт варіації становив 0,075, коефіцієнт нерівномірності - 1,2. Середня абсолютна похибка (MAE) і корінь із середньої квадратичної похибки (RMSE) становили 6,28 та 7,53 вагона відповідно, тобто формально варіативність ряду не дуже висока, і здається, що прогнозування наступних елементів цього ряду не є складним завданням.

На наступному кроці процесу ідентифікації часового ряду доцільно використати регресійно-кореляційні методи. На рисунку 3.9 подана автокореляційна функція такого часового ряду.

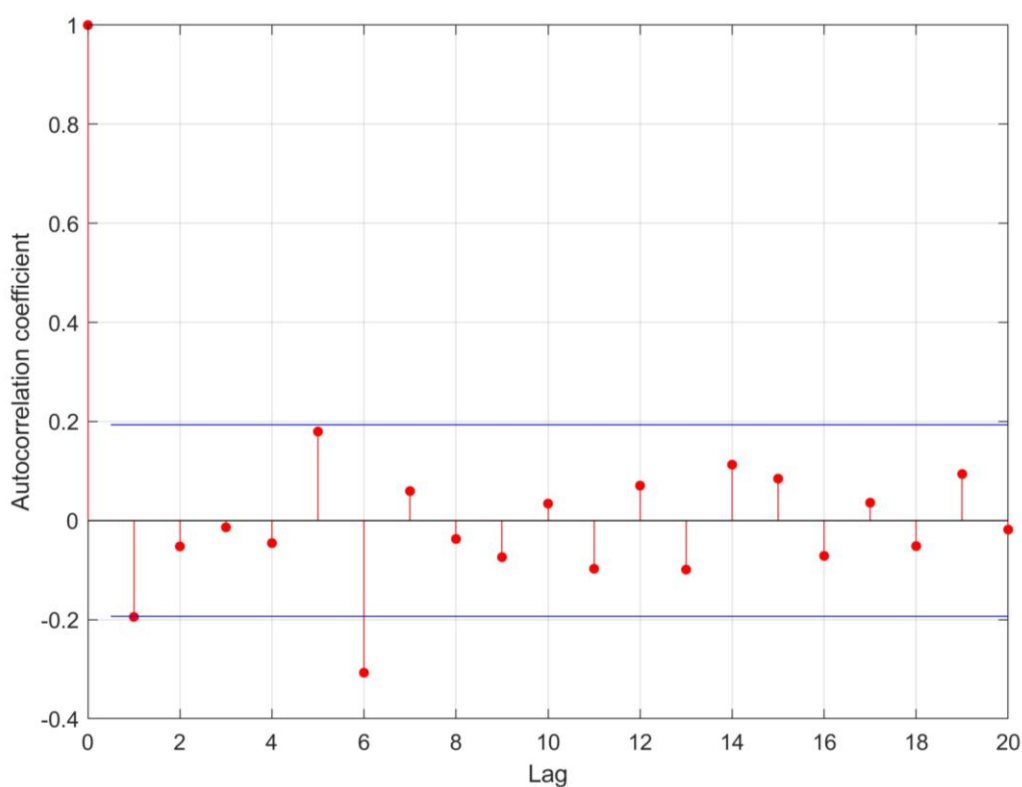


Рисунок 3.9 – Автокореляційна функція часового ряду добового вагонопотоку

Визначені автоматично рівні значущості становили -0.195 і 0.195 відповідно. Середнє абсолютне значення автокореляційної функції (ACF) [46, 47] такого часового становить лише 0.087, що вказує на дуже слабку автокореляцію. Це свідчить про те, що дані не мають значної сезонності або циклічності [48, 49] і, імовірно, є випадковим процесом із мінімальними взаємозалежностями між спостереженнями [50, 51].

Отже, уже на стадії застосування класичних регресійно-кореляційних методів виявлено, що елементи часового ряду слабо пов'язані між собою і фактично не можуть бути ефективно використані для прогнозування майбутніх елементів цього ряду [52, 53]. Однак отриманий результат дещо протирічить отриманим статистичним показникам ряду [54].

Отже, необхідно провести подальші дослідження із застосуванням більш сучасних методів. Одним із таких методів є метод вейвлет-спектрограми [55]. Вейвлет-перетворення є потужним інструментом для аналізу часових рядів, що дає змогу досліджувати часово-частотні характеристики даних [56, 57].

Вейвлет-спектрограма (або вейвлет-аналіз) - це метод аналізу часових рядів, який використовує вейвлети для розкладання сигналу на різні частотні компоненти залежно від часу [58, 59]. Вейвлети є короткими функціями, які можуть бути використані для локалізованого аналізу сигналів як у частотній, так і в часовій області. Вони відрізняються від традиційних методів Фур'є, які використовують синусоїдальні функції постійної частоти. На рисунку 3.10 подана вейвлет-спектрограма такого часового ряду.

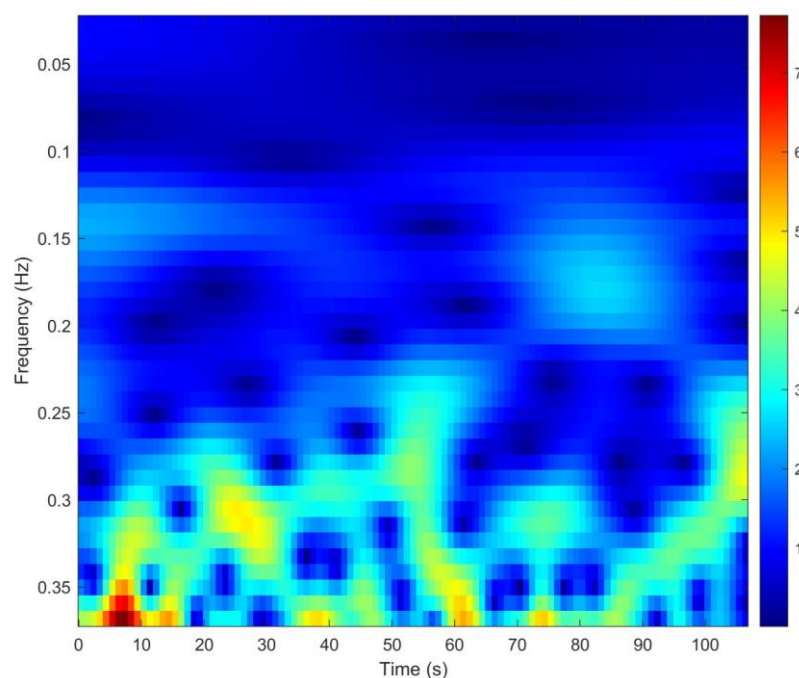


Рисунок 3.10 – Вейвлет-спектрограма часового ряду добового вагонопотоку

Дослідження проводили в середовищі Matlab. Було застосовано вейвлет-перетворення за допомогою функції 'bump', яка переважно і призначена саме для дослідження часових рядів. Вейвлет-спектрограма побудована для візуалізації змін частотних компонентів у часі. Частота дискретизації становила 1 Гц, що є стандартним масштабом для дослідження часових рядів.

Складна часово-частотна структура спектрограми показує, що частотні компоненти даних змінюються в часі. Яскраві області в нижній частині спектрограми вказують на наявність активних частотних компонентів, які швидко змінюються в часі. Це свідчить про високий рівень невизначеності даних.

У центральній частині спектрограми, де крайові ефекти мінімальні, також спостерігають чіткі ознаки нестабільності та непостійності частотних компонентів, що підтверджує наявність значної невизначеності даних.

Спостерігають достатньо широкий діапазон частотних компонентів, що вказує на складну та багатокомпонентну структуру часового ряду, а це є ознакою невизначеності та хаотичності. Крім того, у різні моменти часу спостерігають різкі зміни інтенсивності частотних компонентів. Ці зміни можуть вказувати на нелінійну та непередбачувану поведінку часового ряду.

Отже, вейвлет-спектрограма такого часового ряду демонструє значну невизначеність і хаотичність даних. Складна часово-частотна структура, широкий діапазон частот і висока інтенсивність змін є основними ознаками, що вказують на високий ступінь невизначеності даних.

Наступний метод, який також доцільно застосувати для дослідження такого часового ряду, є R/S-аналіз [60]. R/S-аналіз (англ. Rescaled Range Analysis), або аналіз масштабованого розмаху – це метод статистичного аналізу часових рядів, використовуваний для виявлення тривалих залежностей і оцінювання фрактальних характеристик часових рядів. R/S-аналіз часто застосовують для обчислення так званого показника Херста [61], який характеризує ступінь невизначеності і випадковості чи, навпаки, передбачуваності часового ряду.

R/S-аналіз – це метод оцінювання довгострокової пам'яті та фрактальних характеристик часових рядів, який вимірює залежність між розмахом (range)

накопичених відхилень і стандартним відхиленням, нормуючи цей розмах. Показник Херста (англ. Hurst exponent), отриманий із цього аналізу, показує рівень автокореляції: значення $H > 0,5$ вказують на позитивну автокореляцію [62], $H < 0,5$ – на антиперсистентність, $H \approx 0,5$ – випадковий процес. На рисунку 3.11 наведена R/S-діаграма, отримана під час аналізу такого часового ряду.

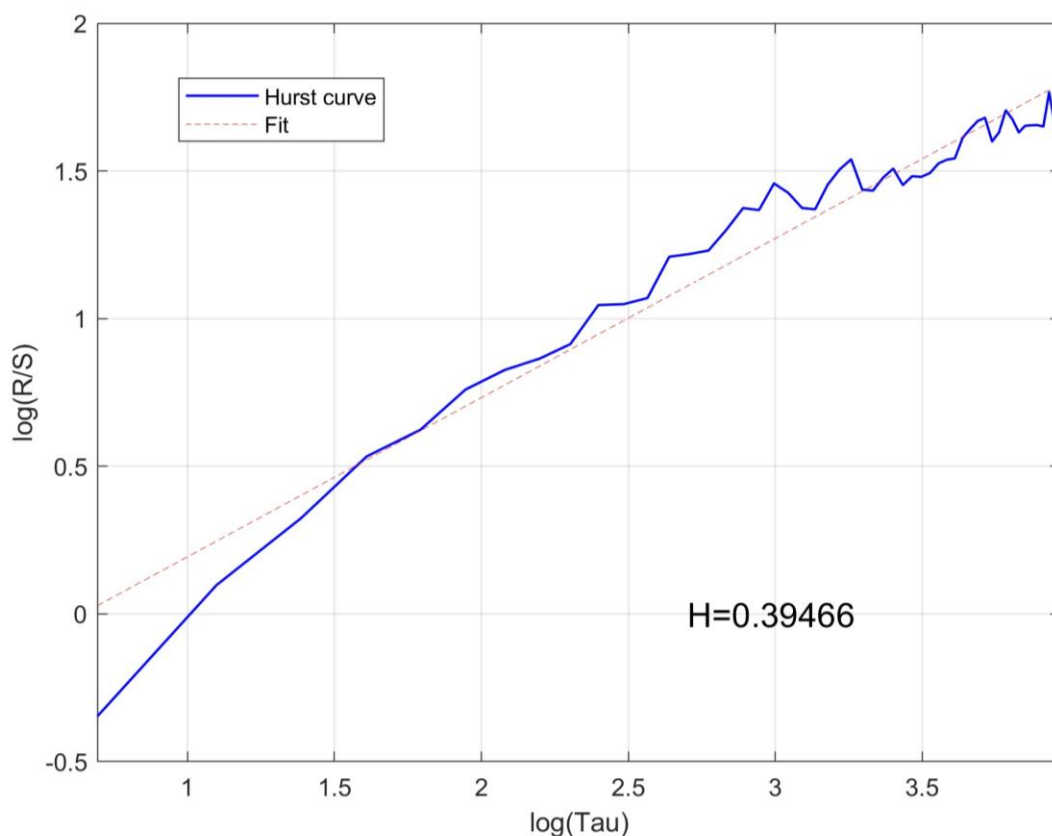


Рисунок 3.11 – R/S-діаграма часового ряду добового вагонопотоку

У результаті проведеного R/S аналізу часового ряду було виявлено значні відхилення від прямої лінії на логарифмічному графіку $\ln(R/S)$ по $\ln(n)$. Графік демонструє численні зубці, що вказують на складні та неоднорідні залежності даних. Така структура R/S кривої свідчить про високий рівень невизначеності та стохастичності часового ряду.

Під час виконання алгоритму R/S аналізу був обчислений показник Херста, величина якого $H = 0,395$.

Така величина показника Херста свідчить про те, що, з одного боку, він є відносно близьким до значення 0,5 ($H \approx 0,5$) [63]. Це означає, що ряд є значною мірою випадковим і незалежним. Така характеристика вказує на погану передбачуваність і відсутність довготривалих залежностей, що можна інтерпретувати як невизначеність. З іншого боку, $H < 0,5$ одночасно говорить про те, що цьому часовому ряду притаманна й антиперсистентна поведінка. Антиперсистентна поведінка є найбільш важливою ознакою невизначеності та високої волатильності часового ряду, оскільки часті зміни напрямку (на кшталт функції Вейєрштраса) роблять прогнозування майбутніх елементів ряду практично неможливим.

Досліджуваний часовий ряд поєднує одразу два компоненти невизначеності, які мають різну природу, - це стохастичність (у сенсі незалежності елементів і відсутності пам'яті) і антиперсистентність (нетримання трендів і різкі та непередбачувані за напрямком коливання).

Комбінація випадковості та антиперсистентності свідчить про те, що такому часовому ряду одночасно притаманна стохастичність і хаотичність.

Отже, на основі всіх проведених аналізів можна зробити висновок, що прогнозування поведінки такого часового ряду є вкрай складним завданням через його непередбачувану та волатильну природу. Такі дані потребують застосування методів високого ступеня складності для аналізу та моделювання для досягнення адекватних прогнозів. Фактично майже єдиний раціональний підхід для прогнозування таких даних - це застосування щонайменше НМ глибинного навчання або ще більш складних сучасних генеративних архітектур НМ.

3.3 Аналіз стохастичних властивостей параметрів експлуатаційної роботи на прикладі даних вхідного вагонопотоку сортувальної станції, поданого як двозмінний часовий ряд

Як було зазначено вище, якісні прогнозні дані добової чисельності вагонопотоків на СС потрібні для здійснення планування переважно на тактичному рівні. Для ефективного планування роботи станції на оперативному рівні потрібні більш динамічні дані. Тож необхідно дослідити, наскільки відповідні історичні дані є придатними для генерування на їхній основі вихідних даних для здійснення оперативного планування, зокрема в автоматизованому або автоматичному режимі. Для здійснення ефективного оперативного планування роботи СС навіть на найменший стандартний плановий період, якій дорівнює 6 год, необхідно мати достатньо точні прогнозні дані про динаміку надходження вагонів із диференціацією за напрямками прямування. Розглянемо реальні історичні дані, отримані на сортувальній станції Д (таблиця Е.2, додаток Е). Дані являють собою інформацію про інтервали між прибуттям поїздів у розформування та дані про склад вагонів за напрямками прямування. Отже, ці дані певною мірою пов'язані між собою, і їх недоцільно розглядати окремо, адже в такому випадку буде втрачено значну частку інформації про відношення цих двох змінних між собою. Ці історичні дані доцільно подати як двозмінний часовий ряд. Розглянемо як першу змінну величини інтервал між прибуттям поїздів, за другу змінну приймемо чисельність партій вагонів певного напрямку, що надходять до станції у складі цих поїздів. І хоча у складі цих поїздів прибувають одночасно декілька груп вагонів різних напрямків прямування, але ми розглянемо лише один напрямок для спрощення досліджень. Ми маємо два пов'язані між собою часові ряди, що є так званим двозмінним часовим рядом [64]. Першим етапом дослідження, як відомо, є процес ідентифікації такого двозмінного часового ряду. На рисунку 3.12 подані часові ряди чисельностей вагонних груп певного напрямку прямування, що надходять до станції

у складі поїздів, і часових інтервалів між поїздами, а також первинні результати ідентифікації цих рядів.

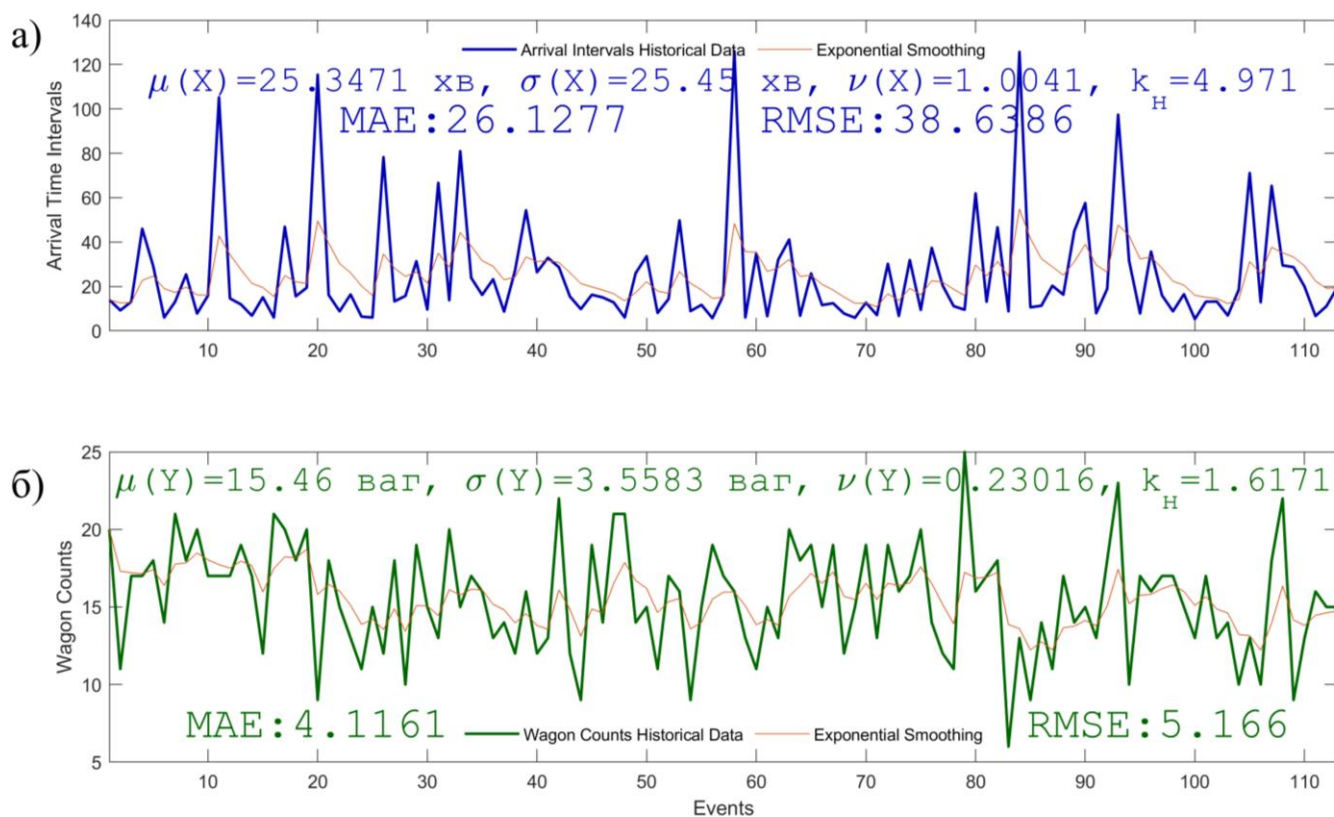


Рисунок 3.12 – Результати ідентифікації двозмінного часового ряду:

а) інтервал між надходженням груп вагонів; б) чисельність груп вагонів

Результати ідентифікації двозмінного часового ряду наведені в таблиці 3.1.

Таблиця 3.1 – Результати ідентифікації двозмінного часового ряду

Змінна	μ	σ	ν	k_H	MAE	RMSE	MAE/ μ , %	RMSE/ μ , %
Інтервал між надходженням груп вагонів	25,35	25,45	1,004	4,97	26,13	38,64	103,08	152,44
Чисельність груп вагонів	15,46	3,56	0,23	1,62	4,12	5,16	26,62	33,42

Як можна бачити з графіка (рисунок 3.12, а), перша змінна містить дані, які фактично можна кваліфікувати як статистичні викиди, про що свідчить надвисокий

коефіцієнт нерівномірності 4,97, що призводить до того, що, зокрема, величина похибки RMSE більш ніж у 1,5 раза (152,44 %) перевищує величину математичного очікування (таблиця 3.1). Однак, як видно з того самого графіка (рисунок 3.12, а), подібні викиди є не якимось рідкісним явищем, а цілком природними для такого процесу надходження вагонів до СС.

Аналізуючи статистичні параметри цих двох часових рядів, можна зробити висновок, що, на перший погляд, вони демонструють суттєві відмінності в ступені варіативності та передбачуваності.

Для другого ряду середнє значення $\mu = 15,46$ і порівняно невеликий коефіцієнт варіації $\nu = 0,23$ вказують на відносну стабільність та узгодженість [65] цих показників. Проте значна величина коефіцієнта нерівномірності $k_n = 1,62$ свідчить про наявність помітних відхилень від «типового» рівня.

Більш того, значення похибок [66] MAE (4,12) і RMSE (5,17) демонструють наявність відчутних абсолютних помилок і розкидів даних, що може ускладнювати точне прогнозування та моделювання процесів, пов'язаних із цими даними.

Так само для першого ряду характерна значно більша варіативність. Середні значення $\mu = 25,35$ можна порівняти з першим, але набагато більший коефіцієнт варіації $\nu = 0,97$ і коефіцієнт нерівномірності $k_n = 4,97$ вказують на домінування стохастичних коливань.

Значні величини MAE (26.13) і RMSE (38.64) для другого ряду наочно підтверджують високий рівень невизначеності та непередбачуваності в даних. Фактично ці дані свідчать про вкрай нестабільну, «вибухоподібну» динаміку.

На рисунку В.2 (додаток В) наведена 3D-гістограма частотного розподілу такого двозмінного часового ряду. Ця гістограма частот демонструє складний, нерівномірний розподіл, який відрізняється від класичного купола Гаусса. Гістограма містить кілька локальних піків і провалів, що свідчить про неоднорідність процесів, поданих як часовий ряд.

Іншим важливим дослідженням, спрямованим на виявлення взаємозв'язків між змінними двозмінного часового ряду, є обчислення крос-кореляційної функції.

Крос-кореляція є ефективним інструментом для аналізу багатозмінних часових рядів, коли цікавить вплив однієї змінної на іншу з плином часу. Це дає змогу виявляти затримки, встановлювати причинно-наслідкові зв'язки між сигналами або процесами і глибше розуміти їхню взаємодію. На рисунку 3.13 наведені значення крос-кореляційного коефіцієнта залежно від зсувів між змінними.

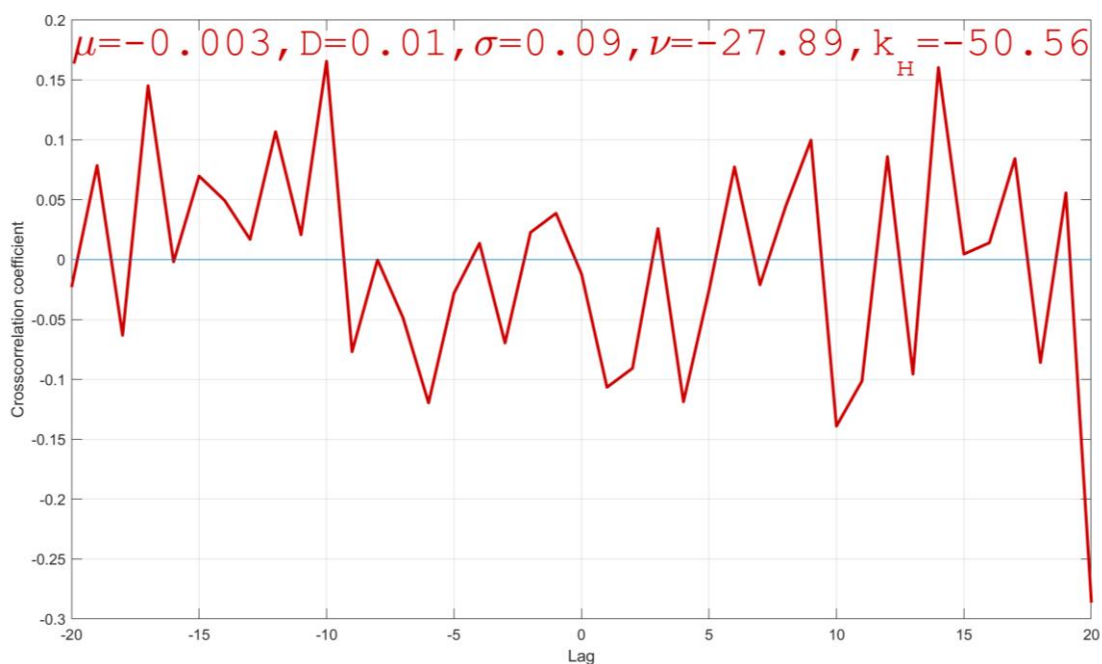


Рисунок 3.13 – Крос-кореляційний коефіцієнт між змінними «інтервал між надходженнями груп вагонів» і «чисельність груп вагонів» залежно від зсуву

Аналіз результатів крос-кореляції свідчить про наявність складних взаємозв'язків між двома часовими рядами. Значення крос-кореляції коливаються від -0.2864 до 0.1656, що вказує на змішану природу кореляції. Зокрема, значення на лагах, як-от -15, демонструє значну негативну кореляцію, у той час як на лагу 11 спостерігається помірна позитивна кореляція. Це свідчить про те, що зміни в одному ряді можуть суттєво впливати на інший, але з затримкою, що вносить елементи хаотичності в моделювання їхньої взаємодії.

Наявність як позитивних(додатних?), так і негативних(від'ємних?) значень крос-кореляції підкреслює асиметрію у впливах між змінними, що так само є

ознакою невизначеності. Слід зазначити, що кореляції, особливо на критичних лагах, можуть бути спотворені зовнішніми факторами або часовими ефектами, не враховуваними у простих авторегресійних моделях.

Отже, результати аналізу коефіцієнтів крос-кореляції вказують на складну і непередбачувану природу взаємодії між змінними такого часового ряду, що ускладнює точність прогнозів і моделювання цього процесу.

Важливим доповненням до аналізу крос-кореляції є аналіз взаємної інформації (англ. Mutual Information, MI), використовуваний для оцінювання міри залежності між двома випадковими змінними. Він дає змогу визначити, наскільки знання про одну змінну зменшує невизначеність щодо іншої. Взаємна інформація є важливим інструментом у статистиці та теорії інформації, оскільки дає змогу аналізувати зв'язки між даними, виявляти приховані закономірності та досліджувати структуру інформації у складних системах. На рисунку 3.14 наведені результати обчислень функції взаємної інформації залежно від зсуву між змінними двозмінного часового ряду.

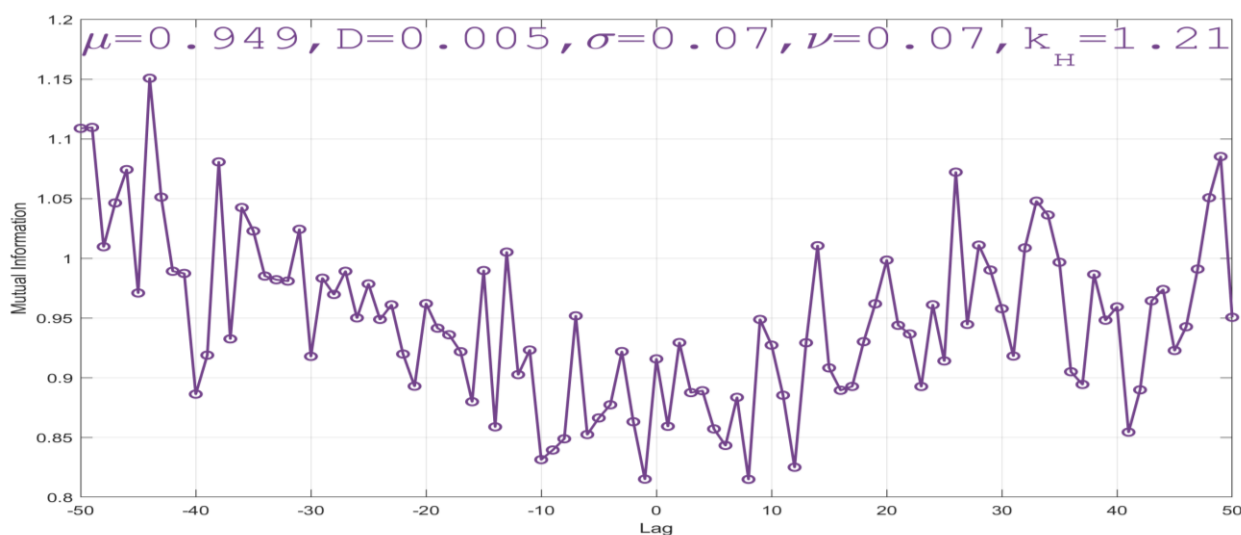


Рисунок 3.14 – Значення показника взаємної інформації між змінними «інтервал між надходженнями груп вагонів» і «чисельність груп вагонів»

За отриманими даними (рис. 3.13) можна зробити висновок, що зв'язок між часовими рядами має непостійний і хаотичний характер. Взаємна інформація коливається без явної закономірності, що вказує на відсутність стабільної

залежності між сигналами. Такі коливання можуть свідчити про наявність суттєвої невизначеності у взаємодіях двох рядів, а також про нелінійну та складну природу цих зв'язків.

Колівання значень взаємної інформації вказують на хаотичні взаємозв'язки, які не сліднують передбачуваному або впорядкованому патерну. Різні лаги показують або підсилення, або послаблення зв'язку, що може бути ознакою того, що ряди взаємодіють випадково, не демонструючи явної узгодженості.

Більш того, низькі мінімальні значення на ряді лагів (~ 0.83) показують, що на певних часових лагах кореляція є дуже слабкою, що ще більше підтверджує наявність значної невизначеності та хаотичності у взаємодіях між сигналами. Це вказує на те, що один часовий ряд не може передбачити інший з достатньою точністю, а їхній взаємозв'язок переважно характеризується випадковими флуктуаціями, ніж регулярністю.

Отже, взаємна інформація на цих даних демонструє відсутність стійкого зв'язку, а для динаміки взаємодії між рядами характерні нелінійність і складність, що ускладнює прогнозування і виявлення чітких закономірностей.

Тест Бройша-Пагана (англ. Breusch-Pagan Test) є статистичним методом, використовуваним для перевірки наявності гетероскедастичності в регресійних моделях, а багатозмінний часовий ряд також можна подати як регресійну модель. Гетероскедастичність виникає, коли дисперсія залишків не є постійною для різних значень незалежних змінних, що може свідчити про те, що модель не повністю враховує структуру даних або існує певна систематична зміна дисперсії в часі чи за різних значень змінних. Нульова гіпотеза цього тесту стверджує, що залишки є гомоскедастичними, тобто їхня дисперсія є приблизно однаковою для всіх спостережень. Якщо нульова гіпотеза не відхиляється, можна вважати, що дисперсія залишається стабільною. Якщо ж вона відхиляється, це свідчить про наявність гетероскедастичності, що вказує на додаткову невизначеність у моделі.

Мета тесту Бройша-Пагана в цьому випадку полягає в оцінюванні наявності гетероскедастичності в залишках регресійної моделі, де предиктором, наприклад, є кількість вагонів у групі, а респонсом – інтервал між надходженнями груп. Тест дає

змогу визначити, чи змінюється варіація інтервалів залежно від значень предиктора, що вказує на можливу непередбачуваність у зв'язку між цими змінними. На рисунку 3.15 наведені результати тесту Бройша-Пагана, а також гістограма залишків. Як свідчать дані статистичної гістограми (рис. 3.15), розподіл залишків суттєво відрізняється від нормального розподілу. Це вказує на невідповідність між фактичними залишками і теоретичною нормою, підтверджуючи наявність невизначеності в досліджуваному двозмінному часовому ряді.

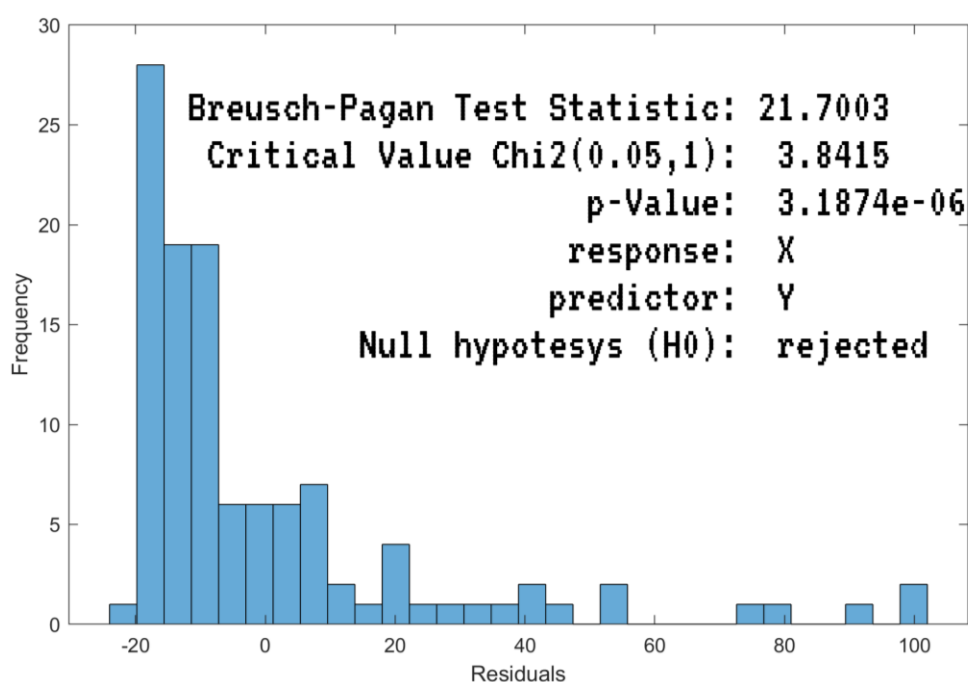


Рисунок 3.15 – Статистична гістограма розподілу залишків моделі та результати тесту Бройша-Пагана

Про це ж свідчить і квантиль-квантиль діаграма (англ. Q-Q plot) (рисунок 3.16), яка також вказує на те, що розподіл залишків, отриманих у результаті проведення тесту Бройша-Пагана не відповідало нормальному закону (точки не лежать на прямій лінії). Зокрема, діаграма нагадує напівмісяць, який перетинає червону діагональну лінію, яка відповідає нормальному розподілу залишків, що також доводить той факт, що залишки, отримані як різниця між модельними і фактичними даними, не підпорядковуються нормальному закону.

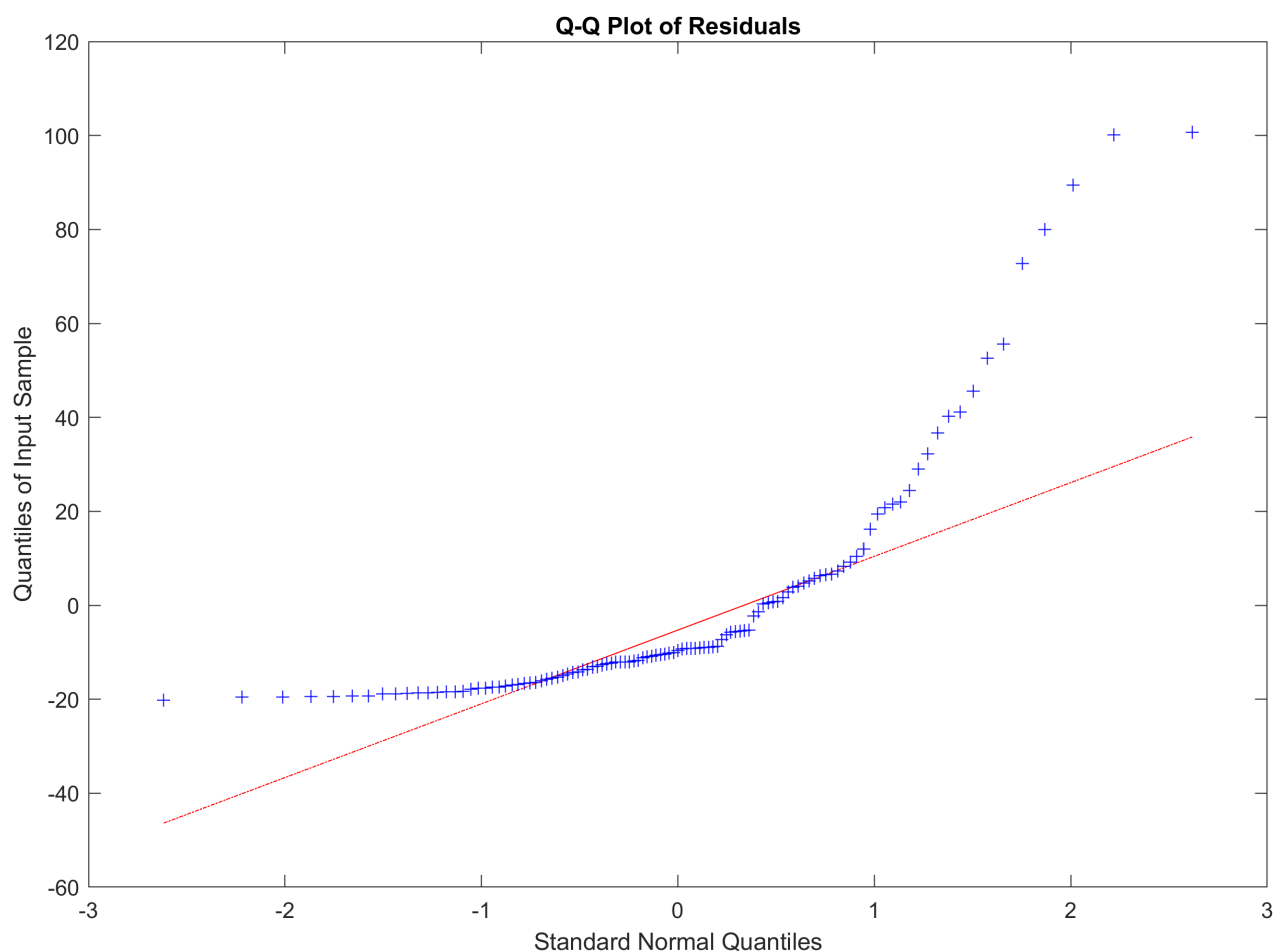


Рисунок 3.16 – Квантиль-квантиль діаграма залишків, отриманих у результаті проведення тесту Бройша-Пагана із двозмінним часовим рядом

За результатами проведеного тесту Бройша-Пагана для двох змінних отримано значення статистики 21.7 і відповідне близьке до нуля р-значення $3.1874e-06$, що дає змогу з високою впевненістю відхилити нульову гіпотезу про відсутність гетероскедастичності. Це свідчить про те, що дисперсія залишків не є постійною, а отже, спостерігається додаткова невизначеність у поведінці двовимірного ряду. З огляду на те, що гетероскедастичність може впливати на точність регресійних оцінок, ці результати вказують на потенційну хаотичність і складність структури даних. Така ситуація підкреслює невизначеність у моделях, які описують цей двовимірний часовий ряд, для чого потрібні подальші дослідження для більш точного моделювання та прогнозування.

Отже, наявність гетероскедастичності підкреслює важливість використання нестандартних методів і підходів для аналізу даних і моделювання такого процесу, оскільки традиційні підходи можуть бути ненадійними в умовах змінної дисперсії.

Ще одним важливим тестом, який доцільно застосовувати для поглибленого аналізу багатозмінних часових рядів, є тест причинності Грейнджера, який визначає, чи допомагають попередні значення одного ряду (змінної) прогнозувати інший ряд. Якщо включення лагів змінної X покращує прогноз для змінної Y , тоді X «викликає» Y в сенсі Грейнджера.

У контексті цього тесту розглядають дві моделі. Перша – модель без X :

$$Y_t = \alpha_0 + \sum_{i=1}^p \alpha_i Y_{t-i} + \varepsilon_t . \quad (3.1)$$

Інша модель включає змінну X і має вигляд

$$Y_t = \alpha_0 + \sum_{i=1}^p \alpha_i Y_{t-i} + \sum_{i=1}^p \beta_i X_{t-i} + \varepsilon_t , \quad (3.2)$$

де p – кількість лагів; α_0 – вільний член; α_i, β_i – коефіцієнти регресії; Y_{t-i}, X_{t-i} – значення залежної і незалежної змінних відповідно в момент часу $t-1$; ε_t – похибка або залишок моделі в момент часу t .

Для перевірки нульової гіпотези тесту Грейнджера, яка полягає у виключенні впливу лагованих значень однієї змінної на значення іншої змінної, можна використовувати різні статистичні критерії, у першу чергу це критерій Фішера.

F-статистика (критерій Фішера) тесту причинності Грейнджера порівнює дві моделі:

$$F = \frac{(RSS_{обм} - RSS_{необм}) / m}{RSS_{необм} / (n - k)} , \quad (3.3)$$

де $RSS_{обм}$, $RSS_{необм}$ – суми квадратів залишків обмеженої і необмеженої моделей відповідно; кількість лагів; m – кількість додаткових параметрів, n – кількість спостережень, k – кількість параметрів у повній моделі.

Під час дослідження оцінили взаємозв'язок між змінними двозмінного часового ряду за допомогою тесту Грейнджера, мета якого перевірити наявність причинного зв'язку між змінними, поданими в даних, через оцінювання нульової гіпотези про те, що одна часова серія не є причиною іншої.

У таблиці 3.2 наведені результати тесту Грейнджера відповідно до гіпотези про відсутність впливу другої змінної двозмінного часового ряду на першу, тобто впливу чисельностей груп вагонів на інтервали між їх надходженнями до станції.

Таблиця 3.2 – Результати тесту про вплив змінної Y на змінну X

Номер	Нульова гіпотеза (H_0)	Відхиляється	Розподіл	χ^2	p-значення	Критичне значення χ^2
1	Виключити	H_1	$\chi^2(12)$	10.1005	0.60714	21.0261
2	вплив змінної Y із затримкою в моделі X	H_1	$\chi^2(13)$	10.3070	0.66866	22.3620
3		H_1	$\chi^2(1)$	0.1513	0.69734	3.8415
4		H_1	$\chi^2(11)$	7.5667	0.75151	19.6751
5		H_1	$\chi^2(10)$	6.4339	0.77759	18.3070

У таблиці наведена статистика χ^2 замість статистики Фішера тому, що сучасні математичні бібліотеки і математично-орієнтовані мови програмування використовують дещо більш складні моделі для виконання тесту Грейнджера. Наприклад, варіант тесту Грейнджера в середовищі MATLAB (англ. Granger causality and block exogeneity tests for vector autoregression (VAR) models) за наявності значної кількості лагів подає дані послідовностей часових рядів як векторні авторегресійні моделі, у цьому випадку застосовано статистику χ^2 для оцінювання одночасного впливу кількох параметрів.

У проведеному тесті Грейнджера використано кілька підходів для оцінювання причинно-наслідкових зв'язків між змінними. Для простих моделей із невеликою кількістю лагів часто застосовують F-статистику, базовану на співвідношенні дисперсій двох моделей: моделі з лагами та моделі без лагів. Однак у випадку більш

складних моделей, таких як векторна авторегресійна модель (VAR), особливо за наявності значної кількості лагів, застосовують статистику хі-квадрат, яка дає змогу оцінити одночасний вплив кількох параметрів.

У випадку з VAR-моделлю і тестом Грейнджера, застосовуваним для цієї моделі, перевіряють гіпотезу про те, чи можна виключити всі лаги однієї змінної з рівняння іншої змінної. Якщо нульова гіпотеза не відхиляється, це свідчить про те, що лаги однієї змінної не впливають на іншу змінну. Статистика χ^2 є узагальненням для таких багатолагових моделей і перевіряється за відповідним розподілом χ^2 для визначеної кількості ступенів свободи.

Отже, під час проведеного тесту, де використовували хі-квадрат статистику, було отримано значення критерію для кожного з рівнянь моделі. Незважаючи на відмінність у використанні статистичних критеріїв (F або χ^2), суть перевірки нульової гіпотези залишається незмінною: якщо статистика не перевищує критичне значення, ми не маємо підстав відхиляти нульову гіпотезу, що вказує на відсутність статистично значущого причинно-наслідкового зв'язку між змінними.

Таке використання χ^2 тесту є типовим для багатовимірних авторегресійних моделей, особливо зі збільшенням кількості лагів, коли потрібно враховувати сукупний вплив множинних параметрів на результат.

У таблиці 3.3 наведені результати тесту Грейнджера відповідно до гіпотези про відсутність впливу першої змінної двозмінного часового ряду на другу, тобто впливу інтервалів між їх надходженнями до станції на чисельність груп вагонів. У таблиці відібрані п'ять лагів із найменшими p -значеннями.

Таблиця 3.3 – Результати тесту про вплив змінної X на змінну Y

Номер	Нульова гіпотеза (H0)	Відхиляється	Розподіл	χ^2	p-значення	Критичне значення
1	Виключити вплив змінної X із затримкою у моделі Y	H _i	$\chi^2(20)$	28.5414	0.0972	31.4104
2		H _i	$\chi^2(2)$	2.9467	0.2292	5.9915
3		H _i	$\chi^2(1)$	1.2956	0.2550	3.8415
4		H _i	$\chi^2(4)$	4.3122	0.3654	9.4877
5		H _i	$\chi^2(3)$	2.9346	0.4018	7.8147

Аналіз результатів показав, що всі *p*-значення в таблицях 3.2 і 3.3 знаходяться вище рівня значущості $\alpha = 0.05$. Це вказує на відсутність статистично значущих доказів для відхилення нульової гіпотези про те, що часові ряди не мають причинного зв'язку.

Додатково в таблиці 3.3 розраховані значення статистики хі-квадрат також не перевищують відповідні критичні значення для всіх лагів. Зокрема, для розподілу Chi2(20) значення статистики (28.541) виявилось менше критичного (31.41), що підтверджує, що нема підстав відхиляти нульову гіпотезу. Аналогічно для інших розподілів (Chi2(2), Chi2(1), Chi2(4), Chi2(3)) статистичні значення також були значно нижчими за критичні, що підкреслює відсутність причинного зв'язку.

Результати зворотного тесту (тобто впливу першої змінної на другу), наведені в таблиці 3.2, також не показали статистично значущої причинності. В усіх випадках ми не можемо відхилити нульову гіпотезу (H0), яка стверджує, що вплив попередніх значень першої змінної на другу змінну відсутній. У кожному з перевірених випадків значення статистики χ^2 (наприклад 10.101 для 12 лагів, 10.307 для 13 лагів тощо) є нижчим за відповідні критичні значення. Це означає, що нема підстав відхиляти нульову гіпотезу на рівні значущості 5 %.

Величини *p*-значень значно перевищують традиційний поріг 0.05, вказуючи на те, що ймовірність помилково відхилити нульову гіпотезу є надто високою. Найменше значення *p*-value становить 0.60714, що також значно перевищує прийняту величину статистичної значущості ($\alpha=0.05$).

Отже, обидва напрямки тестування (як вплив першої змінної на другу, так і другої змінної на першу) підтвердили відсутність причинного зв'язку між змінними.

Звідси випливає, що в часових рядах не виявлено статистично значущих взаємозв'язків у рамках тесту Грейнджера.

Ці результати вказують на відсутність вираженої причинності між змінними, що може свідчити про значний рівень невизначеності, притаманний такому процесу надходження вагонів до СС. Також відсутність статистично значущих зв'язків може свідчити про те, що в системі існує складна динаміка, не відображувана в простих моделях. Це також підкреслює, що змінні можуть взаємодіяти в більш складний спосіб, ніж передбачають класичні моделі взаємодії.

Крос-вейвлетний аналіз є потужним інструментом для дослідження залежностей між двома часовими рядами в частотно-часовій області. Його застосовують для виявлення спільної періодичності між рядами, зміни цих періодів у часі, а також визначення фазових зсувів між сигналами.

В основі методу лежить вейвлет-перетворення, яке дає змогу подати часову функцію як суму вейвлетів різних масштабів і зсувів. Крос-вейвлетний аналіз поєднує вейвлет-перетворення двох рядів для отримання крос-вейвлетного спектра – двовимірної матриці, яка відображує енергію спільних частотних компонент двох сигналів у певні моменти часу. Вейвлет-функція $\psi(t)$ визначають як хвилю, локалізовану в часі та частоті, що забезпечує можливість одночасно аналізувати частотну і часову складові.

Для виконання крос-вейвлетного аналізу для двох сигналів $X(t)$ і $Y(t)$ обчислюють їх, а крос-вейвлетний спектр $W_{XY}(a,b)$ визначають як добуток вейвлет-перетворень цих сигналів:

$$W_{XY}(a,b) = \left| \int_{-\infty}^{\infty} X(t) \psi^* \left(\frac{t-b}{a} \right) dt \cdot \int_{-\infty}^{\infty} Y(t) \psi \left(\frac{t-b}{a} \right) dt \right|, \quad (3.4)$$

де $\left(\frac{t-b}{a}\right)$ – аргумент вейвлет-функції $\psi(\dots)$, який визначає, як саме сигнал

масштабований і зсунутий для аналізу; t – змінна часу; b – зсув, який визначає, у який момент часу ми розглядаємо сигнал; a – це масштаб (чи «ширина» вейвлету), що дає змогу змінювати фокус на короткострокові або довгострокові зміни в сигналах; $\psi(\dots)$ – вейвлет-функція, тобто спеціальна функція комплексної змінної, як таку часто застосовують, наприклад, вейвлет Морле, Гаусса, Скейк, Хаара та інші; $\psi^*(\dots)$ – комплексно-спряжена функція до вейвлету $\psi(\dots)$.

Цей метод має кілька переваг порівняно з іншими підходами для аналізу кореляцій між часовими рядами, такими як стандартна кореляція або спектральний аналіз. По-перше, можна досліджувати взаємозв'язки між рядами не тільки в загальному вигляді, але й у кожен конкретний момент часу та для кожної частоти. По-друге, крос-вейвлетний аналіз корисний для виявлення нелінійних і нестабільних відношень, які можуть змінюватися з часом.

Важливою властивістю є також можливість виявлення фазової різниці між двома часовими рядами. Фаза визначає затримку або випередження одного ряду відносно іншого на певних часових інтервалах і частотах, що дає змогу аналізувати причинно-наслідкові зв'язки або вплив одного сигналу на інший.

Крос-вейвлетний аналіз використовують у різних сферах, зокрема економіці для аналізу взаємозв'язків між економічними індикаторами, кліматології для вивчення спільних коливань між кліматичними змінними та інших наукових галузях, де необхідно дослідити складні залежності між часовими рядами. На рисунку 3.17 наведена поверхня спектрограми двозмінного часового ряду, отримана під час виконання процедури крос-вейвлет-аналізу.

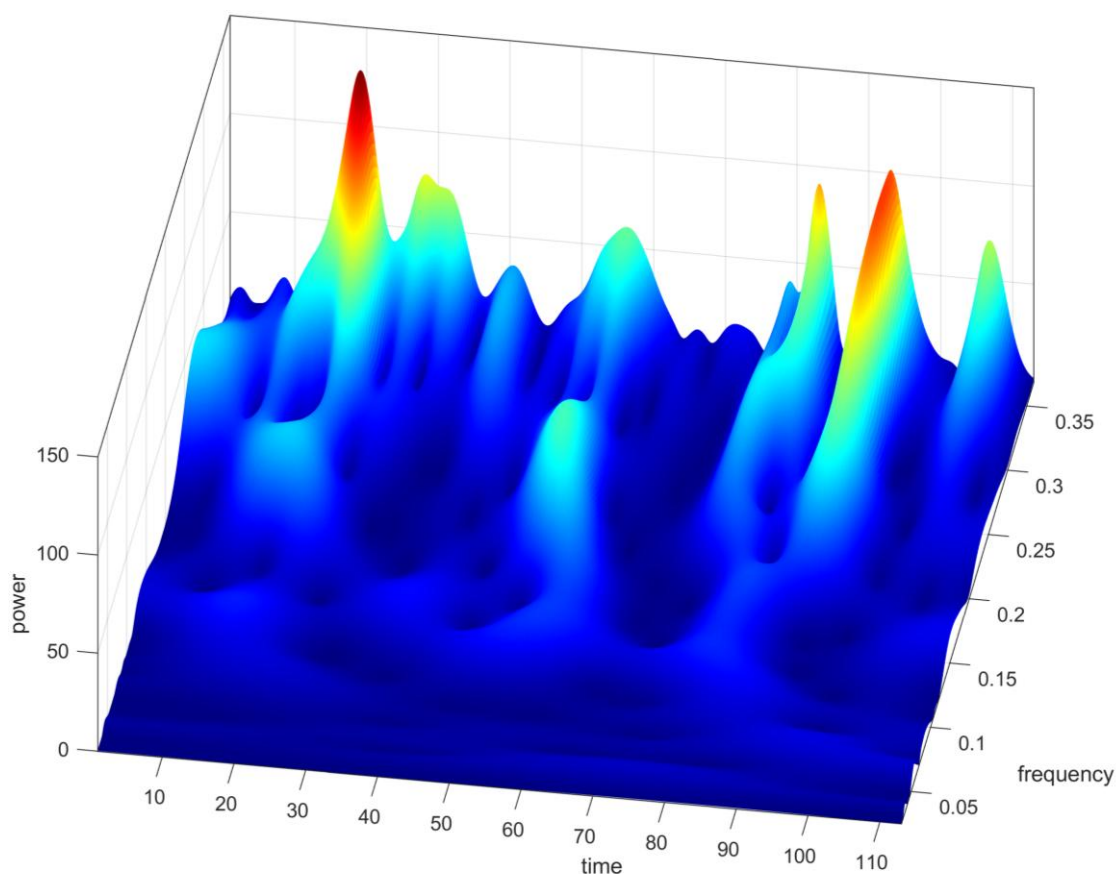


Рисунок 3.17 – Поверхня спектрограми двозмінного часового ряду, отримана під час крос-вейвлет-аналізу

Аналіз спектральних даних, поданих як матриця, що відображує результати крос-вейвлетного перетворення, виявляє надзвичайно складну та хаотичну картину, яка, безсумнівно, свідчить про наявність суттєвої невизначеності в підоснові цих сигналів. З огляду на наявні частоти та їхні відповідні спектральні характеристики можна одразу зазначити, що в системі присутня нелінійність настільки потужного характеру, що будь-які спроби наближення до стабільних чи гармонійних моделей практично неможливі. Поведінка спектра в кожній із частотних зон демонструє складну динаміку, де впливи з різних частот накладаються один на один, створюючи ефект непередбачуваності та хаосу.

Особливо помітним є те, що на певних частотах, таких як 0.35 і 0.36, спостерігають різкі піки, що можуть бути інтерпретовані як прояви певних резонансних явищ, проте ці явища не можна розглядати як стабільні чи

прогнозовані. Скоріше за все це випадкові сплески, які свідчать про хаотичні динаміки, керовані складними нелінійними взаємодіями між складовими сигналу. Спектр не демонструє чіткої закономірності чи гармонійності, що характерно для більш детермінованих систем. Натомість він підкреслює глибоку невизначеність, яка пронизує всі рівні аналізованого сигналу.

Ця невизначеність особливо виразна в нижніх частотних діапазонах, де інтенсивність коливань не лише варіюється з частотою, але й виявляє себе як серія випадкових флуктуацій, що кидають виклик класичним підходам для аналізу спектральних даних. Не існує стабільного переходу від однієї частоти до іншої, що могло б бути передбачуваним; натомість ми бачимо картину неперервного відхилення та дивергенції, де кожен новий спектральний показник відкриває новий рівень хаосу.

Невизначеність, яка впливає на ці дані, також має комплексний характер, що підтверджує складну нелінійність у поведінці системи. Можна припустити, що система, яка генерує ці спектральні дані, має низку внутрішніх взаємодій, що не можуть бути описані лінійними рівняннями чи простими детермінованими моделями. Через це будь-яка спроба досягти точного прогнозування або моделювання даних у межах класичної науки лише підкреслить той факт, що реальна динаміка настільки непередбачувана, що межі нашого розуміння виявляються вузькими і недостатніми.

Більш того, спектральні характеристики даних вказують на те, що спроби встановити чітку математичну модель зіткнуться з фундаментальними перешкодами. Будь-які припущення про можливу гармонійність або детермінованість розбиваються об стіну складної взаємодії нелінійних факторів, які породжують ці дані. У такій системі, схоже, нема місця для класичної детерміністичної науки; натомість кожен новий вимір відкриває нові шари невизначеності, і навіть наявність випадкових сплесків не може бути пояснена за допомогою традиційних підходів.

Отже, ці дані є яскравим прикладом того, як хаотичні, нелінійні системи кидають виклик нашим уявленням про прогнозованість і наукову певність. Вони

змушують нас усвідомити, що за межами стабільних і передбачуваних явищ завжди існує світ динамічної невизначеності, у якому детерміністичні закони можуть лише приблизно описати поверхню того, що відбувається насправді.

У теорії динамічних систем показник Ляпунова є важливим інструментом для оцінювання ступеня хаотичності та невизначеності системи. Він характеризує швидкість розходження траєкторій у фазовому просторі, даючи змогу виміряти чутливість до початкових умов. Отже, визначення показника Ляпунова в такому випадку зазвичай формулюють із застосуванням термінів диференційного числення.

Однак для обчислення показника Ляпунова для систем, описуваних дискретними послідовностями (наприклад часовими рядами), може бути використана формула [69, 70]

$$\lambda = \lim_{t \rightarrow \infty} \frac{1}{t} \ln \frac{d(t)}{d(0)}, \quad (3.5)$$

де $d(t)$ — відстань між двома близькими траєкторіями в час t ; $d(0)$ — початкова відстань між ними.

Однак якщо система описана багатовимірними послідовностями, тоді як мету тесту Ляпунова доцільно вибрати сукупну оцінку взаємного впливу змінних у контексті хаотичної динаміки.

Нехай маємо двозмінний часовий ряд, що складається з двох часових рядів $x(t)$ та $y(t)$, де t — дискретний час (лічильник подій послідовності). Основна ідея полягає в обчисленні показника Ляпунова для взаємодії цих рядів через лагові значення. Це дає змогу оцінити ступінь невизначеності з прогнозуванням одного ряду, ураховуючи поведінку іншого.

Для складних систем, що складаються з двох або більше часових рядів, доцільним є використання розширеного підходу — тесту Ляпунова для взаємодіючих часових рядів. Цей метод дає змогу оцінити, як зміна одного ряду впливає на

поведінку іншого, що є важливим для систем, де присутня взаємодія або кореляція між змінними.

Для двозмінного часового ряду доцільно оцінити взаємний вплив змінних у контексті стійкості і чутливості системи. Отже, такий показник доцільно назвати крос-показником Ляпунова. У контексті двозмінного часового ряду аналіз чутливості системи слід виконувати з урахуванням змінної затримки або зсуву (лагу), щоб побудувати залежність показника Ляпунова від різних масштабів взаємодії змінних.

За такою залежністю можна оцінити рівень хаотичності системи та її невизначеність, що особливо актуально для дослідження складних стохастичних систем, де взаємодія між змінними є важливим фактором динаміки. Виходячи з цієї логіки такий крос-показник Ляпунова доцільно обчислювати за формулою

$$\lambda(\hat{x}_t, \hat{y}_t, \tau) = \frac{1}{n - \tau} \sum_{t=1}^{n-\tau} \ln \left(\sqrt{(\hat{x}_t - \hat{x}_{t+\tau})^2 + (\hat{y}_t - \hat{y}_{t+\tau})^2} + \varepsilon \right), \quad (3.6)$$

де $\hat{x}_t, \hat{y}_t$ – нормалізовані значення елементів першого і другого рядів на t -му кроці; $\hat{x}_{t+\tau}, \hat{y}_{t+\tau}$ – нормалізовані значення елементів першого і другого рядів на τ кроків вперед відносно t -го кроку; τ – змінна кількість кроків зсуву між змінними (лаг); n – довжина часового ряду; ε – доданок у вигляді малої величини для запобігання обчислення логарифма від 0.

Отже, ми інтерпретуємо відстань між нормалізованими рядами як розходження траєкторій у часі. Нормалізація необхідна для приведення рядів до одного рівня, такий підхід дасть можливість адекватно оцінювати відстані та розбіжності між рядами.

На рисунку 3.18 наведені результати аналізу чутливості процесу надходження вагонів до СС, поданого як двозмінний часовий ряд, у вигляді динаміки крос-показника Ляпунова залежно від зсуву між рядами (лагу).

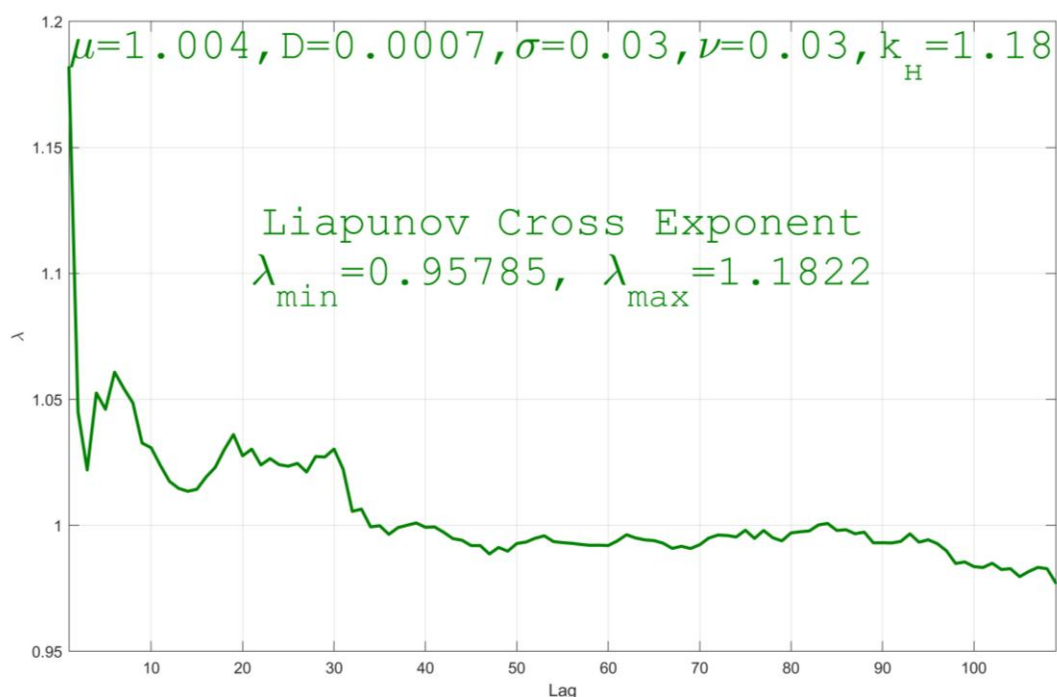


Рисунок 3.18 – Динаміка крос-показника Ляпунова двозмінного часового ряду

Наведена динаміка демонструє варіювання значень показника у межах від 0.958 до 1.182, що дає змогу зробити кілька важливих висновків про хаотичність і непередбачуваність системи.

Для невеликих значень зсувів показник Ляпунова перевищує значення 1, досягаючи максимуму приблизно 1.18. Це є головним свідченням високого рівня хаотичності процесу. Додатне значення показника Ляпунова, яке на початковій ділянці інтервалу дослідження перевищує одиницю, вказує на те, що система демонструє експоненційне розходження траєкторій із часом, що характерно для високохаотичних систем.

Така поведінка системи означає її надзвичайну чутливість до початкових умов, за якої навіть мінімальні зміни на початку призводять до значних відмінностей у подальшій еволюції системи. Локальні сплески та немонотонна динаміка крос-показника вказують на складну, нелінійну структуру взаємозв'язків між змінними та їхню хаотичну природу, які до того ж трансформуються зі зміною масштабу. Найбільш цікавим аспектом є те, що, незважаючи на загальну об'єктивну тенденцію до зниження показника Ляпунова зі збільшенням лагу (адже відбувається

усереднення за більшістю елементів), на значному інтервалі ($35 < \tau < 95$) значення показника залишаються практично незмінними, а на деяких ділянках навіть незначно зростають. Це свідчить про те, що система навіть за умов згладжування флуктуацій зі збільшенням лагу виразно демонструє стійку хаотичну поведінку.

Виявлені характеристики поведінки такої системи, зокрема надзвичайно високі значення показника Ляпунова, які сягають 1,18, свідчать про те, що досліджувана система перебуває в стані глибокого детермінованого хаосу. Така екстремальна хаотичність динаміки є джерелом фундаментальної невизначеності та унеможливорює будь-які точні та достовірні прогнози щодо майбутньої поведінки системи навіть за умов детального знання її початкового стану.

Отже, під час ідентифікації двозмінного часового ряду було виявлено, що такі статистичні похибки, як MAE та RMSE, сягають високих значень, а для змінної, що є інтервалом між надходженням груп вагонів, ці похибки взагалі перевищують її математичне сподівання. Це щонайменше свідчить про неможливість застосування лінійних моделей для моделювання цього транспортного процесу.

Крім того, аналіз проведених статистичних тестів, серед яких крос-вейвлетний аналіз, крос-кореляція, тест Ляпунова та причинно-наслідковий аналіз за Грейнджером, вказує на суттєвий рівень невизначеності, притаманний процесу надходження груп вагонів до СС, описуваний двозмінним часовим рядом. Тип цієї невизначеності можна охарактеризувати як змішаний, оскільки тут присутні ознаки як алеаторної невизначеності, зумовленої стохастичною природою складових процесу, так і епістемічної невизначеності, викликаній нестачею вичерпної інформації та повного розуміння взаємного впливу складових процесу, а також прихованих системних ефектів.

Додатково тест на гетероскедастичність виявив слабкість взаємозв'язків між змінними та нестационарність процесу. Ця нестационарність ще більше ускладнює процес моделювання, оскільки системі властива варіативність, змінювану з часом.

Загалом результати тестів демонструють, що система поєднує елементи передбачуваності та хаотичної поведінки, що значно ускладнює точне моделювання. Виявлена невизначеність у поведінці змінних є наслідком складної нелінійної

динаміки, а також недостатньої інформації, що частково пов'язано зі спрощеннями в обробці даних і математичному моделюванні.

Отже, для досліджуваного двозмінного часового ряду характерний високий рівень непередбачуваності й хаотичності, що потребує адаптації або розроблення нових підходів для моделювання та прогнозування, які могли б урахувати ці нерегулярності й багатофакторну природу процесів.

3.4 Висновки до третього розділу

Залізничний транспорт є стратегічно важливим елементом інфраструктури країни, який забезпечує не тільки перевезення пасажирів і вантажів, але й сприяє економічному розвитку та соціальній стабільності. В умовах сучасного світу залізничний транспорт відіграє головну роль у зменшенні транспортних заторів, зниженні викидів CO₂ та інших забруднювачів, а також у забезпеченні доступу до віддалених територій. Ефективне функціонування залізничної системи потребує системного аналізу показників її експлуатаційної діяльності.

Досліджено показники експлуатаційної діяльності залізничної системи України з метою оцінювання їхньої ефективності та виявлення основних проблем. Аналіз показав, що сучасний стан залізничного транспорту свідчить про негативні тенденції у зменшенні обсягів перевезень пасажирів і вантажів. Особливо сильно ці проблеми загострилися під впливом військових конфліктів, але їхнє коріння сягає глибше і виявилось наслідком більш ранніх процесів. Вантажні перевезення стали основним джерелом прибутку для залізниць, але зменшення їхніх обсягів призвело до скорочення доходів і відповідно обмежень у фінансуванні інфраструктури та розвитку парку рухомого складу.

На основі статистичних даних проаналізовано динаміку чисельності маневрових локомотивів і виявлено, що вона демонструє стійкий тренд до зменшення. Нестача маневрових засобів призводить до зниження якості управління

технологічними процесами на ТС, що може спричиняти системні порушення в підсистемах місцевої роботи ТС, які проявляються в регулярних затримках прибирання вагонів і подавання їх на вантажні fronti, під'їзні колії підприємств і підлеглі станції місцевої роботи. Регулярні збої в місцевій роботі викликають порушення раніше побудованих планів, створюють додаткові джерела невизначеності і ризику, які так само призводять до таких негативних наслідків, як збільшення простоїв рухомого складу і відповідне збільшення тривалості процесу доставлення вантажів, а також неоптимальний розподіл порожніх вагонів. Це у свою чергу частково підтверджує стала негативна динаміка порожнього пробігу вагонів, яка демонструє тенденцію до збільшення. Відповідне підвищення середньої тривалості обігу вантажного вагону також підтверджує наявність проблем під час технологічного процесу роботи ТС і невідповідність управлінських технологій реальним умовам експлуатаційної роботи. Збільшення величини обігу вантажного вагону відповідно викликає нестачу вагонів, доступних для навантаження.

Як підтвердження такого явища, статистичні дані також демонструють різке зростання цін на оренду вагонів у відповідь на їх дефіцит, що також підкреслює невідповідність сучасних управлінських технологій в умовах зростаючої чисельності факторів невизначеності та ризику.

Додатково аналіз показав, що збільшення виплат штрафів за несвоєчасне доставлення вантажів свідчить про серйозні проблеми управління логістичними процесами та недостатній рівень адаптації до мінливої оперативної обстановки. Це підкреслює необхідність впровадження сучасних методів ризик-менеджменту для ефективного управління експлуатаційною діяльністю залізничного транспорту.

Проведено комплексну процедуру аналізу якості інформаційних потоків і зразків даних, використовуваних для управління експлуатаційною роботою залізничного транспорту, статистичні дослідження на прикладі даних динаміки добового вагонопотоку СС, поданого у вигляді часового ряду. Статистичні показники, обчислені під час ідентифікації такого часового ряду, а також результати обчислення автокореляційної функції, вказують на слабку зв'язність між його елементами.

Дослідження, проведене із застосуванням методу вейвлет-аналізу, продемонструвало складну часово-частотну структуру ряду. Вейвлет-спектрограма, побудована для візуалізації змін частотних компонентів, показала, що частотні компоненти суттєво змінюються в часі. Особливо це помітно в центральній частині спектрограми, де спостерігали нестабільність і широку варіативність частотних компонентів, що є ознаками невизначеності та хаотичної поведінки даних.

Наступний етап дослідження включав застосування методу R/S аналізу. Під час виконання процедури тесту побудовано R/S-діаграму та обчислено величину показника Херста. Отримане значення показника Херста, яке дорівнює 0,395 і вигляд траєкторії R/S-діаграми свідчать про те, що цьому часовому ряду разом із волатильністю, обумовленою стохастичністю, одночасно притаманна волатильність особливого типу – так звана антиперсистентність, тобто тенденція до раптових розворотів трендів.

Крім того, у рамках проведеної процедури оцінювання якості даних, використовуваних для планування та управління роботою елементів ЗТС, зокрема ТС, досліджено параметри динаміки вагонопотоків на прикладі процесу надходження вагонів до підсистеми розформування/формування СС. Цей процес відображує динаміку частини вхідного вагонопотоку СС і описаний двозмінним часовим рядом, де одна змінна є інтервалом між надходженнями груп вагонів, а друга — чисельністю цих груп.

За ідентифікації двозмінного часового ряду встановлено, що такі статистичні похибки, як MAE та RMSE, досягають високих значень, а для змінної, що описує інтервали між надходженнями, ці похибки перевищують її математичне очікування. Це свідчить про непридатність лінійних моделей для моделювання цього процесу.

Тест Грейнджера показав обмеження у виявленні стійких причинно-наслідкових зв'язків між змінними, що, імовірно, пов'язано з варіативністю змінних і впливом зовнішніх факторів, які не були враховані в моделі. Це свідчить про складність взаємодії компонентів системи та можливість впливу прихованих факторів.

Тест Бройша-Пагана виявив наявність гетероскедастичності, тобто мінливості дисперсії залишків моделі залежно від значень незалежних змінних. Така поведінка вказує на потенційні проблеми з адекватністю стандартних моделей лінійних типів, наприклад лінійна регресія, ковзне середнє, ARIMA, експоненційне згладжування тощо, для моделювання або прогнозування такого процесу.

Елементи хаотичності, підтверджені тестом Ляпунова, вказують на присутність детермінованого хаосу, вираженого в тому, що навіть невеликим відхиленням у значеннях однієї змінної відповідають значні коливання іншої змінної, що робить поведінку змінних практично непередбачуваною, навіть за умов квазидетермінованості процесу.

Отже, аналіз процесів переробки та надходження вагонів на сортувальні станції виявив складну комбінацію передбачуваних і хаотичних елементів, що ускладнює їх моделювання та прогнозування. Високий рівень невизначеності, зумовлений нелінійною динамікою та нестачею інформації, свідчить про необхідність розвитку нових підходів для аналізу та управління такими процесами.

Дані про динаміку вагонопотоків, попри високий рівень невизначеності, їм притаманний, залишаються основним ресурсом для створення оперативних і стратегічних планів у залізничній сфері. Проте їх ефективне використання потребує впровадження адаптивних методів моделювання та управління, здатних урахувати високу волатильність і складність транспортних процесів.

Одним із суттєвих бар'єрів на шляху до автоматизації та цифровізації залізничного транспорту є відсутність адекватних підходів для обробки та аналізу таких складних даних. Це призводить до низької ефективності ухвалення управлінських рішень і уповільнення модернізації галузі.

Для підвищення якості управління та стійкості систем залізничного транспорту необхідно розробити високоточні моделі обробки даних і автоматизовані системи управління. Традиційні методи не справляються з викликами, пов'язаними з високою волатильністю і стохастичною природою даних, що потребує кардинальних змін у підходах для управління. Невизначеність є

багатогранним феноменом, який має значний вплив на якість рішень, тому її необхідно враховувати на всіх етапах управлінського процесу.

Отже, розвиток залізничного транспорту потребує системних змін у технологіях і підходах для управління, спрямованих на адаптацію до сучасних викликів і забезпечення конкурентоспроможності в умовах динамічного економічного середовища.

РОЗДІЛ 4

ФОРМУВАННЯ ПІДХОДІВ ДЛЯ НІВЕЛЮВАННЯ ВПЛИВУ ФАКТОРІВ НЕВИЗНАЧЕНОСТІ НА ПРИКЛАДАХ КЛАСИЧНИХ ЗАДАЧ УПРАВЛІННЯ ЕКСПЛУАТАЦІЙНОЮ РОБОТОЮ

4.1 Неточності моделі стратегічного планування як фактори епістемічної невизначеності

У наукових і практичних дослідженнях систем, що включають складні процеси і взаємодії, важливо розуміти і управляти епістемічною невизначеністю. Епістемічна невизначеність виникає через обмеження в нашій здатності знати і зрозуміти всі аспекти системи. Вона є наслідком неповноти або неточності інформації, що впливає на точність і надійність моделей, використовуваних для аналізу та ухвалення рішень.

Моделі є потужними інструментами для спрощення та опису складних реальностей. Вони дають змогу дослідникам і практикам розуміти і прогнозувати поведінку систем у різних умовах. Однак моделі завжди є спрощеними відображеннями реальності і, як наслідок, можуть містити неточності. Ці неточності виникають через припущення і спрощення, використовувані для полегшення обробки даних і розрахунків.

Неточність моделей може мати суттєвий вплив на результати і рішення, засновані на цих моделях. Наприклад, спрощені припущення можуть призвести до помилкових висновків і рішень, що може вплинути на ефективність і точність управлінських стратегій. Важливо розуміти, що неточності в моделях можуть мати різний характер: від статистичних варіацій до структурних помилок, які виникають через обмеження у знаннях або даних.

Одним із підходів для зменшення впливу епістемічної невизначеності є регулярне оновлення і калібрування моделей на основі нових даних. Це дає змогу покращити точність моделей і зменшити вплив неточностей. Загалом управління

епістемічною невизначеністю є критичним для забезпечення надійності і ефективності рішень, заснованих на моделях. Розуміння і врахування обмежень моделей допомагає досягти більш точних і ефективних результатів у різних галузях науки і практики.

Часто моделі відображують реальний процес у спрощеному вигляді, що є наслідком основної ідеї або концепції, яка полегшує аналіз і обробку даних. Це спрощення може включати не лише ігнорування окремих деталей, але й подання цілого процесу на основі спрощеної концепції. Таке спрощення зменшує складність системи до зручного рівня для практичного використання та розрахунків.

Однак у деяких випадках це спрощення може бути настільки значним, що суттєво спрощує або змінює основні характеристики моделювання процесу. Коли модель заснована на спрощеній концепції, уточнення може стати складним і потребувати перегляду основних припущень. Це може включати необхідність урахування нових аспектів або відмови від початкових концепцій, для чого часто потрібні значні зусилля і ресурси.

Навіть за таких обмежень можливі поступові вдосконалення моделі. Додаткові рівні деталізації або корегування початкових припущень можуть підвищити точність моделі, зберігаючи при цьому її основну структуру. Це може передбачати інтеграцію нових даних, удосконалення алгоритмів або адаптацію до змінюваних умов без повної відмови від спрощеної концепції.

Попри труднощі, що виникають з уточненням моделі, такі вдосконалення можуть мати значний вплив на точність результатів і якість подальших досліджень або практичного застосування. Успіх у реалізації цих корективів підкреслює важливість продовження роботи над моделями навіть у випадках, коли спрощення є необхідним для їх практичного використання.

У реальному світі системи часто мають велику складність, що ускладнює створення достатньо точної моделі. Відмінності між моделлю та реальністю можуть бути зумовлені численними факторами, включаючи обмеження в даних, непередбачені зовнішні впливи і складність самих процесів.

Однак, навіть якщо досягти абсолютної точності неможливо, важливо розуміти, що будь-яке уточнення моделі може мати значний вплив на її ефективність. Якщо модель є критично важливою або основною для ухвалення рішень, то навіть невелике уточнення може суттєво покращити її точність і надійність. Це може мати далекосяжні наслідки не тільки для конкретної моделі, але і всіх інших моделей, базованих на ній.

Уточнення моделей може включати внесення додаткових параметрів, перегляд припущень або оновлення даних. Кожне з цих уточнень дає змогу зменшити невизначеність і підвищити відповідність моделі до реальних умов, а це покращує результати, отримані на основі такої моделі і забезпечує більшу впевненість в ухвалених рішеннях.

Отже, навіть часткове покращення моделі може мати велике значення, особливо у випадках, коли модель служить основою для подальших розрахунків і аналізу. Зменшення неточностей і врахування можливих факторів невизначеності є основним для забезпечення точності і надійності результатів, що мають важливе практичне і теоретичне значення.

Модель розрахунку плану формування поїздів є головним інструментом стратегічного планування в залізничному транспорті. Вона фактично виступає системоутворюючою моделлю для всієї системи управління експлуатаційною роботою залізниць. На основі результатів, отриманих із цієї моделі, визначають категорії вантажних поїздів, які відіграють важливу роль у формуванні графіків і розкладів руху для всієї залізничної мережі.

Крім того, ця модель впливає на визначення обсягів сортувальної та маневрової роботи на станціях, а також на розроблення схем роботи магістральних локомотивів. Отже, вона є основою для широкого спектру управлінських рішень, що стосуються експлуатації залізничного транспорту. Завдяки їй забезпечено скоординоване та ефективне функціонування всієї залізничної системи.

Удосконалення і уточнення цієї моделі є важливим завданням, адже її точність і відповідність реальним умовам безпосередньо впливають на оптимізацію всіх аспектів залізничних перевезень. Навіть незначні корективи в цій моделі можуть

мати значний вплив на ефективність роботи залізниць, що підкреслює її стратегічне значення в системі управління залізничним транспортом.

Модель ПФП, як і багато інших моделей, використовуваних відтоді, коли не існувало потужних електронних обчислювальних пристроїв, не позбавлена спрощень.

Модель розрахунку ПФП має багато неточностей, які доцільно було б урахувати. Однак урахування багатьох із цих неточностей зазвичай передбачає врахування результатів обробки статистичних даних. Одна з таких неточностей, наприклад, вказана в роботі [71]. Вона полягає в тому, що в моделях розрахунку ПФП не врахована різниця у швидкостях різних категорій вантажних поїздів, хоча врахування того факту, що, наприклад, середня швидкість дільничних поїздів є меншою за швидкість наскрізних поїздів, дало б змогу отримати більш точний варіант плану, який би раціональніше використовував ресурси ЗТС в процесі просування і обробки вагонопотоків. Однак слід зазначити що така різниця у швидкостях на одних полігонах може бути значною, а на інших - несуттєвою.

Одним із найбільш очевидних спрощень, актуальним для більшості полігонів, є те, що такі параметри, як витрати часу на обробку вагонів на сортувальних станціях, параметри накопичення та інші величини, зазвичай розглядають як константи. Моделі розрахунку ПФП є стратегічними і орієнтованими на середні значення, що виправдано на рівні планування. Однак такий підхід має певну неточність, оскільки не враховує змін цих параметрів не лише через зовнішні фактори, але і внутрішні.

Зокрема, модель не враховує зміни параметрів залежно від поточних значень ступеня завантаженості сортувальних станцій. Навіть якщо в розрахунках введено обмеження, пов'язані з максимальною завантаженістю станцій, класичні методи часто не мають можливості врахувати ці обмеження динамічно. Це призводить до того, що навіть з наближенням завантаженості до граничних значень такі параметри, як часові витрати на обробку вагонів, можуть значно змінюватися.

Нехтування цими змінами може призвести до суттєвих спотворень результатів моделювання. Наприклад, у ситуаціях, коли завантаженість станцій наближається до

критичних показників, часові витрати на обробку можуть суттєво зростати. Якщо ці аспекти не враховані в моделі, на виході можна отримати неадекватні рекомендації, що призведе до неефективності на рівні всієї системи залізничного транспорту. Тому удосконалення моделі шляхом урахування таких факторів є необхідним кроком для підвищення точності та надійності стратегічного планування.

4.2 Визначення залежності витрат вагоногодин для обробки вагонопотоків залежно від рівня завантаженості станції

ПФП являє собою складну технологічну систему, яка синхронізує діяльність усієї залізничної мережі. Цей план регулює призначення поїздів, їхній склад і розподіл груп вагонів на станціях, визначає категорії поїздів, що відправляють, станції для їх розформування, а також розподіл вагонів, включаючи порожній рухомий склад. У процесі формування вантажних поїздів ПФП враховує широкий спектр економічних і технічних факторів, таких як витрати на подавання вагонів до пунктів навантаження, їх обробку та простої на станціях, виконання технічних і вантажних операцій, а також витрати на утримання інфраструктури і персоналу. Основна мета ПФП — мінімізація витрат і максимізація прибутку залізничної компанії через оптимізацію роботи всієї мережі.

ПФП є головним стратегічним інструментом, оскільки охоплює планування перевезень на тривалий період, зазвичай розраховуваним на рік. У процесі розроблення ПФП враховують багато аспектів, таких як попит на перевезення, наявність рухомого складу та пропускна спроможність мережі. Традиційні підходи для розрахунку оптимального ПФП зазвичай використовують критерій мінімізації сумарних вагоно-годин, витрачених на накопичення та обробку вагонів. До того ж сучасні класичні методи переважно передбачають їх застосування без використання комп'ютера. У наш час розробляють нові методи, які також можна віднести до класу класичних, адже вони спрямовані на ручні розрахунки і фактично є удосконаленням

старих класичних методів. Такі методи зазвичай взагалі не використовують цільову функцію в явному вигляді і мають безліч обмежень, які практично не дають змогу змінити модель або урахувати додаткові параметри.

Однак на сьогодні інформаційні системи, наприклад система АСК ВП УЗ Є, містять велику кількість статистичних даних, які могли б бути використані для уточнення моделі розрахунку ПФП. Одним із найбільш важливих моментів, що першочергово потребує уточнення, є параметри, що відповідають за витрати вагоно-годин для обробки вагонопотоків на сортувальних станціях. Моделі, на яких базовані класичні методи, передбачають такі параметри, як величина економії від прослідування технічної станції без переробки, величини параметрів накопичення тощо. І хоча ці параметри є специфічними для кожної технічної станції, їх все ж таки розглядають як сталі величини, однак насправді це не відповідає дійсності, адже у деяких наукових працях і навіть у деяких підручниках з дисципліни УЕР можна зустріти діаграму режимів роботи ТС, як на рисунку 4.1.

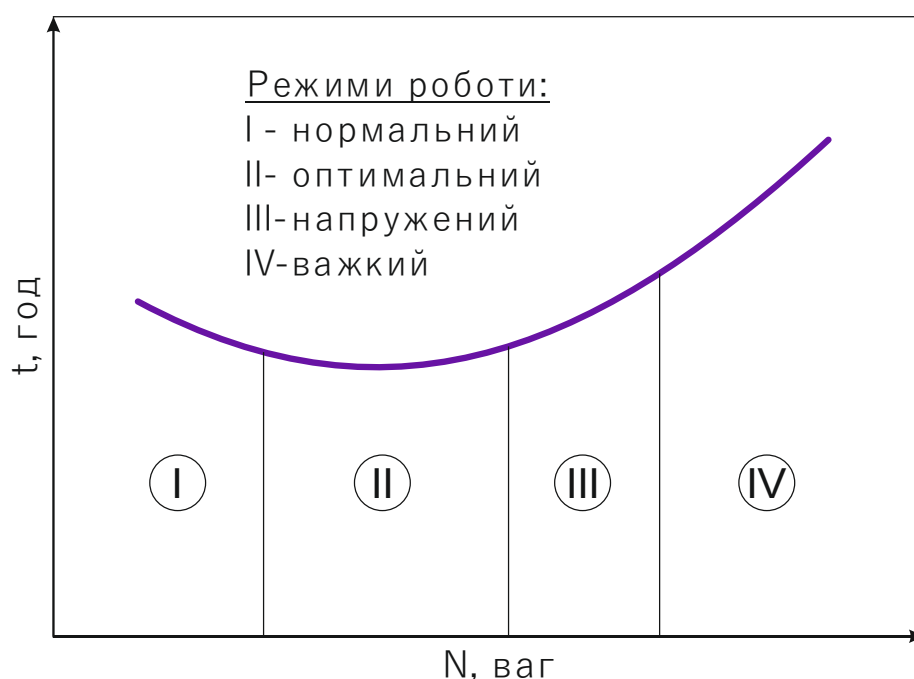


Рисунок 4.1 – Залежність тривалості обробки вагона на технічній станції від рівня її завантаженості та визначення режимів роботи станції

На цій діаграмі виділено чотири режими роботи станції: нормальний, оптимальний, напружений і важкий. Як можна бачити з цієї діаграми, ці режими відрізняються саме величиною середньої тривалості перебування вагона на станції. Як зазначено в підручниках з дисципліни УЕР, час перебування вагона на СС є одним із найважливіших показників її роботи. Наприклад, час перебування на сортувальній станції транзитного вагона з переробкою (саме такими вагонами оперують для розрахунку ПФП) складається з таких елементів:

$$t^{mp.z/n} = t^{nn} + t^{p\phi} + t^{нак} + t^{\phi} + t^{не}, \quad (4.1)$$

де t^{nn} – час перебування вагона в приймальному парку;

$t^{p\phi}$ – час перебування вагона в підсистемі розформування;

$t^{нак}$ – час перебування вагона під накопиченням;

$t^{нак}$ – час перебування вагона в підсистемі формування;

$t^{не}$ – час перебування вагона в парку відправлення (у складі поїзда).

Слід зазначити, що для зручного застосування оптимізаційної моделі розрахунку ПФП слід відмовитися від такого параметра, як економія вагоно-годин від прослідкування станції без переробки, а натомість ввести параметр середніх витрат вагоно-годин на обробку одного вагона.

Отже, якщо для розрахунку ПФП використовувати два основні класи параметрів, що відповідають за витрати: параметр середніх витрат вагоно-годин на обробку одного вагона і параметр накопичення, то можна вважати, що параметр накопичення пов'язаний із часом перебування вагона під накопиченням, тобто третім елементом формули (4.1), а всі інші елементи цієї формули, перший, другий, четвертий і п'ятий, включає параметр середніх витрат вагоно-годин на обробку одного вагона. Крім того, цей параметр також може містити частку витрат локомотиво-годин маневрової роботи, що припадає на один вагон, приведену до вагоно-годин через вартісні показники або прийняті відносні коефіцієнти.

За діаграмою на рисунку 4.1, фактично тривалість перебування можна вважати сталою лише для оптимального режиму роботи. У напруженому і важкому режимах роботи відбувається зростання середнього часу перебування вагона на станції внаслідок збільшення простоїв вагонів з очікуванням операцій через перевантаження станції. Це призводить до збільшення витрат вагоно-годин у процесі обробки вагонопотоків.

Однак, як видно з тієї ж діаграми (рис. 4.1), у так званому нормальному режимі, який ще можна назвати режимом недонавантаження, також відбувається збільшення середньої тривалості перебування вагона на станції, хоча, здавалося б, навпаки мали б повністю зникнути черга на обслуговування і зменшитися простой. Цей феномен можна пояснити тим, що за таких умов вклад у підвищення величини простоїв вагонів починає збільшуватися з боку підсистеми розформування/формування вагонів, а саме починається збільшення тривалості накопичення составів у сортувальних підсистемах станцій. Такий процес подовження тривалості накопичення составів відбувається завдяки тому, що зменшується потік надходження вагонів до станції, і за таких умов накопичити состав до встановленої норми кількості вагонів займає більше часу.

Тривалість перебування вагонів на сортувальних станціях значною мірою визначена рівнем завантаженості цих станцій [72]. Існує оптимальний рівень завантаженості, за якого ефективність роботи ТС, і зокрема СС, сягає максимуму.

Процес формування вантажних поїздів – найбільш складний і трудомісткий технологічний процес на ТС. Складність обумовлена необхідністю багаторазового сортування вагонів, що виникає через обмежену кількість колій для сортування та накопичення вагонів, велику кількість груп вагонів у составі, надання «вікон» для технічного обслуговування та ремонту колій [73, 74].

Отже, наведені в науковій і навчальній літературі дані свідчать про те, що існує залежність непродуктивних простоїв вагонів на ТС, і зокрема на СС, і рівнем їхньої завантаженості. Однією з причин невключення цих залежностей до відповідних моделей управління скоріше за все є те, що раніше не було технічних можливостей для отримання параметрів цих залежностей, а тепер і досі нема

єдиного ефективного методу їх отримання і в жодних службових методичних рекомендаціях нема навіть пропозицій щодо самого виду залежності, яку пропоновано використовувати для відповідних розрахунків.

Слід зазначити, що нас цікавить залежність тривалості простоїв вагонів від рівня завантаженості станції, і насамперед з точки зору загальних витрат вагоно-годин. Якщо ми розглядаємо витрати на переробку вагонопотоків і пов'язані з ними простої вагонів (перший, другий, четвертий і п'ятий елементи формули (4.1)), тобто без урахування процесу накопичення, то можна стверджувати, що ці простої безпосередньо впливають на витрати вагоно-годин, а точніше - це пряма пропорційна залежність, і такі параметри, які приймають за вихідні дані для розрахунку ПФП, як середня величина витрат вагоно-годин на переробку одного вагона на станції, безпосередньо напряду залежать від середньої величини простоїв вагона, а отже, і від величини середньої тривалості перебування вагона на технічній станції.

Однак якщо ми розглянемо другий клас параметрів, використовуваних як вихідні дані для розрахунків ПФП, то побачимо, що тут ситуація дещо інша. Ці параметри, а саме параметри накопичення, використовувані як індикатори витрат вагоно-годин саме в процесі накопичення составів у сортувальних парках або на відповідних коліях станції. Так, параметри накопичення є індикаторами загальних витрат вагоно-годин у процесі накопичення составів, але вони не є індикаторами простоїв вагонів під час цього процесу. А отже, ми маємо ситуацію зовсім іншу, аніж у випадку з першим класом параметрів. Як можна бачити з формули (4.1), витрати вагоно-годин у процесі накопичення составів навіть теоретично не залежать від кількості вагонів і не залежать від ступеня завантаженості станції. Величина параметра накопичення насамперед є наслідком характеру накопичення составів певного напрямку на станції, тобто вона відображує те, наскільки добре організований технологічний процес, ритмічно і своєчасно надходять партії вагонів певних напрямків до станції, ефективно застосовані певні організаційні заходи для пришвидшення процесу формування составів. Звісно, хоча параметри накопичення для розрахунків ПФП - сталі величини, на практиці ж, якщо розглядати певні

відносно короткі інтервали часу, можна спостерігати певні коливання цих параметрів, які можуть бути дуже значними. Однак ці коливання навіть теоретично не пов'язані саме з обсягами вагонопотоків, що надходять до станції, на практиці ж певний вплив кількості вагонів на коливання величин параметрів накопичення все ж може бути, але він незначний і неоднозначний.

І тоді можемо констатувати таке: у випадку, коли кількість вагонів, що надходять у переробку до технічної станції, зменшується, тривалість часу простою одного вагона під накопиченням дійсно може збільшуватися, особливо якщо на станції не будуть вжиті певні заходи для часткової компенсації цього ефекту. Однак на загальні витрати вагоно-годин у підсистемі накопичення цей ефект фактично не впливає, оскільки сумарні витрати, індикатором яких є параметри накопичення, фактично майже не змінюються внаслідок того, що збільшення величини простоїв вагонів у процесі накопичення компенсується зменшенням їхньої загальної кількості.

Отже, ця ситуація, з одного боку, є наслідком теоретичних принципів і понять, на яких базована теорія управління експлуатаційною роботою залізничного транспорту, а з іншого боку, вона відображує практичні аспекти процесу обробки вагонопотоків на технічних станціях, на різних стадіях якого декілька факторів мають відмінні величини впливають на механізми формування витрат вагоно-годин.

За таких умов можна зробити висновок, що корегування витрат вагоно-годин на технічних станціях відповідно до ступеня їхньої завантаженості необхідно здійснювати лише в тій частині витрат, яка відповідає за витрати, пов'язані з переробкою вагонопотоків без урахування процесу накопичення.

Зрозуміло, що витрати вагоно-годин для переробки вагонопотоків за умов, коли станція функціонує в напруженому або важкому режимі, зростають відповідно до ступеня завантаженості (або перевантаженості станції). І це загальне зростання витрат вагоно-годин відбувається не лише за рахунок збільшення вагонів, зростає питома величина витрат, що припадає на один вагон. Характер цього зростання навіть теоретично на різних станціях може бути різним. Зрозуміло, що теоретично ця залежність є нелінійною, однак на різних станціях можуть бути дуже різні умови і

значно відрізнятися технологічний процес, рівень оснащеності тощо. Наприклад, теорія масового обслуговування стверджує, що для системи типу М/М/1, тобто одноканальної системи з марковськими вхідним потоком і потоком обслуговування [75], середній час очікування в черзі дорівнюватиме

$$W_q = \frac{\rho}{\mu(1-\rho)}, \quad (4.2)$$

де $\rho = \frac{\lambda}{\mu}$ – коефіцієнт завантаження системи;

λ – інтенсивність надходження вимог на обслуговування;

μ – інтенсивність обслуговування.

Отже, ця залежність є гіперболічною.

Якщо ми розглянемо трохи іншу систему, наприклад систему типу М/Г/1, тобто потік обслуговування не обмежений пуасонівським потоком [76], то залежність часу очікування буде такою:

$$W_q = \frac{\lambda \cdot E[S^2]}{2(1-\rho)}, \quad (4.3)$$

де $E[S^2]$ – друга моментна характеристика випадкової величини часу обслуговування (математичне сподівання квадрата часу обслуговування);

$\rho = \frac{\lambda \cdot E[S]}{1}$ – коефіцієнт завантаження системи;

$E[S]$ – середній час обслуговування (математичне сподівання тривалості обслуговування).

Отже, ця залежність теж є гіперболічною, або раціональною.

До речі, важливою відмінністю цієї системи від попередньої є те, що в ній час очікування залежить від величини дисперсії часу обслуговування, введеної за

допомогою параметра $E[S^2]$. Тож у системі такого типу середній час очікування збільшуватиметься зі збільшенням варіативності (дисперсії) часу обслуговування, навіть якщо величина середньої тривалості обслуговування буде залишатися незмінною.

Якщо розглядати більш складні системи, такі як система типу G/G/1, тоді час очікування описується наближеною формулою Поллачека-Хінчена [77], яка теж фактично демонструє гіперболічну залежність.

Реальна сортувальна станція - це дуже складний механізм, і загалом, з позиції теорії масового обслуговування, є багатоканальною багатостадійною системою, яка може мати різні комбінації типів потоків руху вимог і потоків обслуговування, які до того ж можуть бути нестационарними.

Задача розрахунку ПФП сама по собі є гранично складною внаслідок її комбінаторної природи, а тому для корегування її моделі доцільно використати максимально прості функції.

Крім того, як було доведено вище, корегування потребує не залежність середньої тривалості перебування вантажного вагона на станції, а параметр витрат вагоно-годин на обробку одного транзитного вагона з переробкою на станції, який необхідно подати як функціональну залежність від коефіцієнта навантаження станції.

Для спрощення подання залежності середніх питомих витрат вагоно-годин на обробку вагона на залізничній технічній станції можна застосувати модель у вигляді ламаної лінії. Такий підхід є доцільним, оскільки на початкових етапах роботи станції, коли ступінь завантаження невеликий, витрати вагоно-годин на обробку кожного окремого вагона можна вважати практично незмінними. Це відповідає горизонтальній ділянці ламаної лінії, де система встигає обробляти потоки вагонів, і додаткове навантаження не впливає на продуктивність.

Однак із досягненням певного рівня завантаження станції ситуація змінюється. Система починає перевантажуватися, що призводить до помітного зростання середнього часу обробки кожного вагона. На цьому етапі ламана лінія

«переламується», і після цього витрати вагоно-годин починають поступово зростати. Це зростання відображує лінійне збільшення часу очікування і обробки вагонів на перевантаженій станції і відповідне зростання витрат вагоно-годин у системі.

Отже, заміна більш складної гіперболічної моделі на ламану лінію в цьому випадку є обґрунтованим спрощенням. Гіперболічні залежності добре описують нелінійний характер зростання часу очікування для перевантаження систем масового обслуговування, але в багатьох практичних розрахунках достатньо застосувати більш просту модель, яка зберігає основні риси цього процесу.

Ламана лінія подібно до гіперболи відображує початкову стабільність витрат вагоно-годин за нормальних навантажень і їхнє поступове зростання після досягнення певного рівня завантаженості. Гіпербола також має асимптоти і за певних умов може наближатися до прямих ліній, що свідчить про схожість поведінки цих функцій.

Математично ламана лінія - також раціональна функція, яка є частковим випадком гіперболічної залежності. Тому таке наближення дасть змогу зберегти основні риси процесу перевантаження системи і спростити обчислення, що особливо важливо для складніших моделей функціонування залізничних технічних станцій, таких як модель розрахунку ПФП.

Отже, наближення гіперболічної залежності до ламаної лінії робить останню ефективним засобом спрощення для використання у складі моделей для практичних розрахунків.

Щоб отримати параметри такої залежності для конкретної станції, доцільно апроксимувати такою функцією відповідні статистичні дані. Крім того, цю залежність доцільно побудувати не від коефіцієнта завантаження, а від реальних обсягів навантаження, адже будь-які нормативні значення рівнів максимального навантаження або подібних показників, прийняті на станції, можуть виявитися невідповідними реальним статистичним даним.

Таку функцію можна записати як [78]

$$t^{обp}(n) = \begin{cases} c & , \text{ якщо } n \leq a \\ c + b(n - a) & , \text{ якщо } n > a \end{cases} \quad (4.4)$$

де n – обсяг вагонопотоку, що надходить у переробку на станцію за добу;

c – середня тривалість обробки одного вагона на станції за неперевантажених режимів роботи станції (без урахування процесу накопичення);

b – тангенс кута нахилу прямої на другій ділянці (після точки a), що є коефіцієнтом зростання часу обробки вагону відносно обсягу перевантаження станції;

a – точка зламу лінії, яка фактично відповідає межі між оптимальним і напруженим режимами роботи станції.

Для зручності проведення обчислень був здійснений перехід від кусково-лінійного до явного аналітичного запису функції:

$$t^{обp}(n) = c + \frac{b}{2}(|n - a| + (n - a)). \quad (4.5)$$

Для такої функції підібрали параметри, які відповідають емпіричним даним, отриманим на одній із сортувальних станцій мережі АТ «Укрзалізниця», за методом найменших квадратів. Результати статистичного моделювання подані на рисунку 4.2.

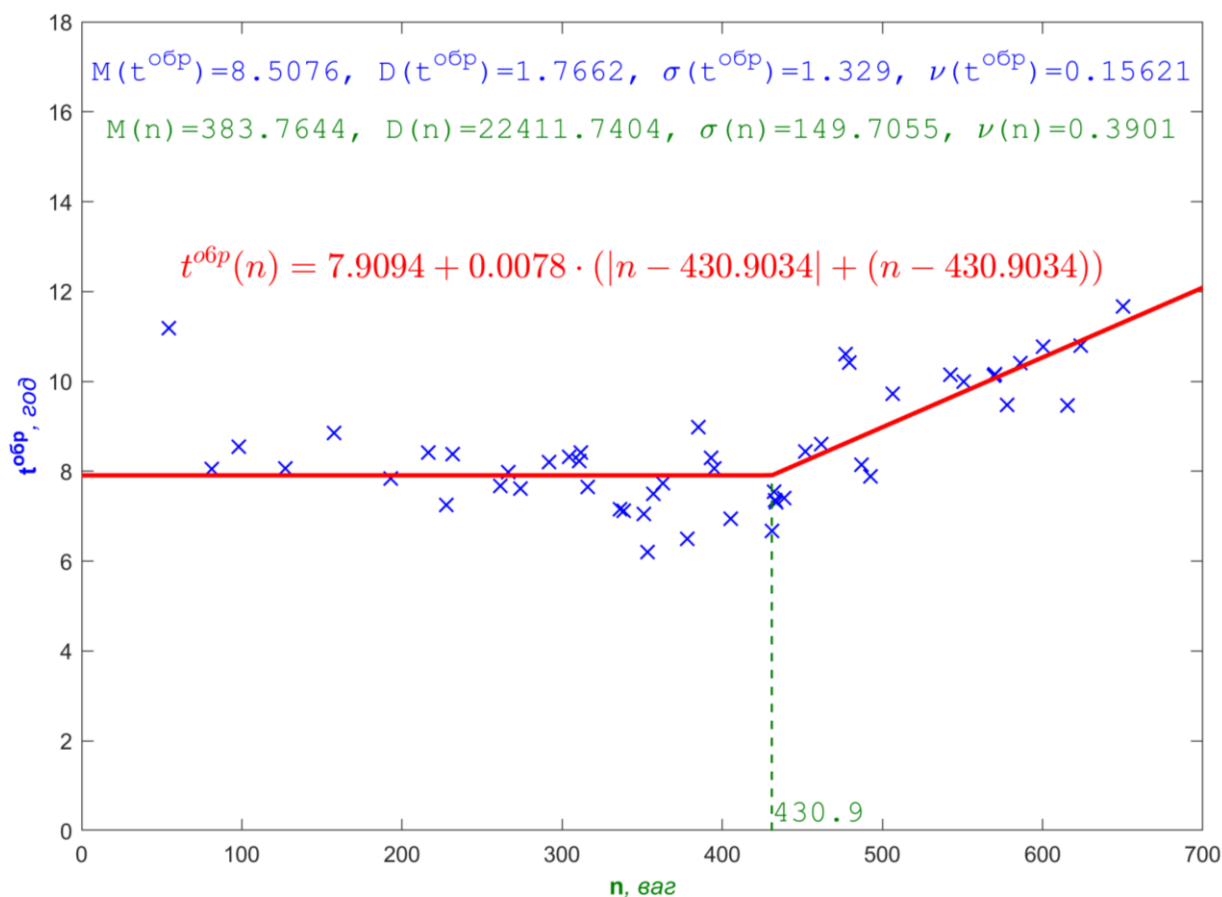


Рисунок 4.2 – Залежність середньої тривалості переробки вагона на технічній станції від розміру добового вагонопотоку, що надходить у переробку

Отже, запропонований підхід, окрім побудови функції залежності середньої тривалості переробки вагона від величини навантаження, також дасть змогу визначити рівень навантаження, який відповідає границі між оптимальним і напруженим режимами роботи технічної станції за реальними статистичними даними. У цьому випадку границя становила 430.9 вагонів (рисунок 4.2). Також під час моделювання на основі статистичних даних була визначена середня тривалість переробки одного вагона на станції за умови, що станція функціонує не в режимах перевантаження. Ця величина становила 7,91 год.

4.3 Формування уточненої оптимізаційної математичної моделі розрахунку ПФП

Запропонований підхід дав змогу на реальних статистичних даних більш точно визначити середню тривалість переробки одного вагона на станції, адже її розраховують не за всіма даними, а лише тими, що відповідають нормальному та оптимальному режимам роботи станції. Одночасно з цим також була визначена реальна величина навантаження станції, яка відділяє оптимальний і напружений режими роботи. Тож, керуючись для розрахунку ПФП не лише нормативним значенням наявної переробної спроможності станції як жорстким обмеженням, яке може вже не відповідати дійсності, а саме цим значенням границі оптимального режиму, можна отримати більш релевантний і оптимальний варіант ПФП. Границя оптимального режиму теоретично має бути меншою за величину наявної переробної спроможності і використана як м'яке обмеження.

Визначивши реальну межу між оптимальним і напруженим режимами роботи станції, доцільно скорегувати модель розрахунку ПФП так, щоб вона була орієнтована на неперевищення цих значень. Такий підхід у масштабах всієї залізничної мережі і річного часового інтервалу, протягом якого діє нормативний документ «Порядок направлення вагонопотоків та організації їх у вантажні поїзди на залізницях України», сформований на основі розрахунків ПФП, дасть змогу зекономити значні ресурси.

Отже, з урахуванням вищенаведених міркувань доцільно здійснити корекцію моделі розрахунку ПФП так, щоб вона більш адекватно і точно моделювала витрати на переробку вагонопотоків на технічних станціях у режимах перевантаження. Це особливо актуально за сучасних умов, бо з закриттям певних сортувальних станцій або переведенням їх в інші категорії технічних станцій, як трапилося зі станцією Лозова РФ «Південна залізниця», відбувається також і поступова деградація сортувальних потужностей по всій системі: закриття колій, парків і цілих сортувальних систем на станціях, вихід із ладу сортувальних пристроїв, зменшення

кількості маневрових засобів і персоналу. Останніми роками все більше набирає обертів тенденція до зменшення сортувальних потужностей на залізничній мережі України. За таких умов функціонування певних станцій у режимах перевантаження нерідке явище. При цьому формально рівень навантаження може бути в межах норми, однак реально цей режим для певної станції може виявитись таким, за якого відбуваються підвищені витрати вагоно-годин для обробки вагонопотоків, тобто це фактично і є режимом перевантаження.

Запропоновано скорегувати модель розрахунку ПФП так, щоб вона враховувала ці збільшення витрат вагоно-годин для обробки вагонопотоків, якщо навантаження станцій перевищує межу оптимального режиму роботи.

З цією метою пропоновано використати функцію, яка буде повертати коефіцієнт збільшення витрат вагоно-годин відповідно до ступеня завантаженості станції:

$$\beta(\rho, \alpha) = \begin{cases} 1 & , \text{ якщо } \alpha \leq 1 \\ 1 + \alpha(\rho - 1) & , \text{ якщо } \alpha > 1 \end{cases} \quad (4.6)$$

де ρ – коефіцієнт навантаження станції (відносно рівня навантаження, який відповідає границі оптимального режиму);

α – коефіцієнт пропорційності між рівнем сумарних додаткових витрат вагоно-годин для переробки вагонопотоків і ступенем перевантаженості станції, тобто він показує скільки відсотків зростання витрат вагоно-годин припадає на 1 % перевантаження.

Цю функцію можна також виразити аналітично без застосування кускового запису як

$$\beta(\rho, \alpha) = 1 + 0,5(|\alpha(\rho - 1)| + \alpha(\rho - 1)). \quad (4.7)$$

Графік цієї функції наведений на рисунку 4.3.

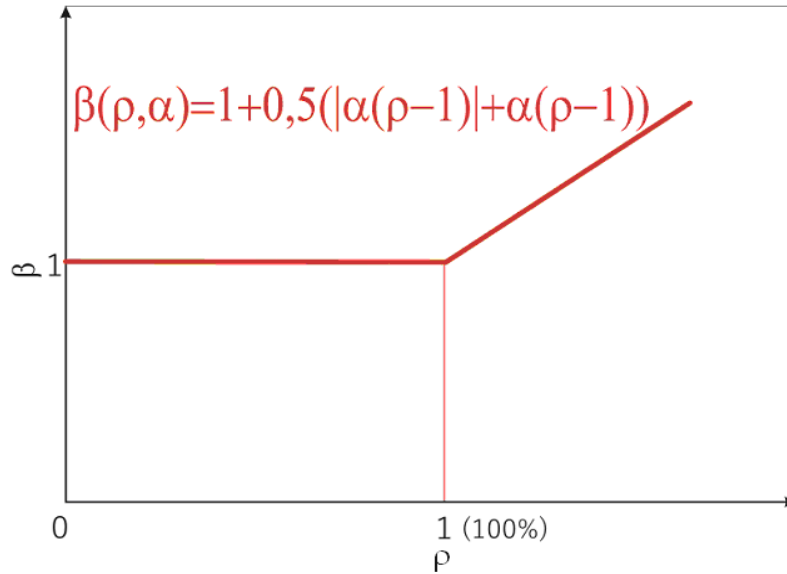


Рисунок 4.3 – Визначення функції коефіцієнта збільшення витрат вагоно-годин

Класичні моделі розрахунку ПФП як критерію оптимізації зазвичай використовують сумарні витрати вагоно-годин. З урахуванням цієї функції змінного коефіцієнта витрат вагоно-годин цільову функцію моделі розрахунку ПФП можна записати як

$$B(W) = \sum_{w \in W} c_w m_w^{норм} + \sum_{w \in W} \sum_{\substack{j \in J_w \\ s_j^{ноч} \neq s_w^{ноч}}} m_i t_w^{обр} \beta \left(\left(\frac{1}{m_w^{zp}} \left(\sum_{\substack{k \in W \\ s_k^{ноч} = s_w^{ноч}}} \sum_{q \in J_k} m_q + \sum_{\substack{y \in J \\ s_y^{кінц} = s_w^{ноч}}} m_y \right) \right), \alpha_w \right), \quad (4.8)$$

де W – змінна поточна множина виділених напрямів (поєднань або пучків струменів), де кожен елемент цієї множини, тобто кожен напрям, заданий як $w = (s_w^{ноч}, s_w^{кінц}, J_w, P_w)$,

де $s_w^{ноч}$ – початкова станція напрямку, $s_w^{кінц}$ – кінцева станція напрямку, P_w – впорядкована множина дільниць залізничної мережі, які відповідають маршруту

такого напрямку, J_w – підмножина струменів вагонопотоку, що входять у цей напрямок, кожен струмінь заданий як $j = (s_j^{noch}, s_j^{кінц}, P_j, m_j)$,

де s_j^{noch} – початкова станція струменя, $s_j^{кінц}$ – кінцева станція струменя, P_j – впорядкована множина діляниць залізничної мережі, які відповідають маршруту цього струменя (є підмножиною множини P), m_j – потужність струменя вагонопотоку (сеоредньодобова кількість вагонів);

J – множина всіх струменів вагонопотоку;

P – множина всіх діляниць мережі;

C_w – параметр накопичення на початковій станції напрямку w ;

$m_w^{норм}$ – норма кількості вагонів у складі поїзда на початковій станції напрямку w ;

$t_w^{обп}$ – витрати часу на переробку одного вагона (транзитного з переробкою) на початковій станції напрямку w ;

$\beta(\rho, \alpha)$ – функція, що повертає значення коефіцієнту збільшення витрат на переробку вагонів залежно від ступеня завантаження станції ρ і коефіцієнту зростання витрат вагоно-годин для переробки вагонопотоків α на станції;

m_w^{zp} – гранична максимальна кількість вагонів, що може бути перероблена станцією, яка є початковою станцією напрямку w , в оптимальному режимі роботи.

Перший доданок цільової функції являє собою витрати в процесі накопичення составів, другий доданок - витрати, пов'язані з переробкою транзитних вагонопотоків на технічних станціях.

Для забезпечення якісної області припустимих рішень, тобто такої, що містить лише формально коректні варіанти ПФП, на змінні моделі необхідно накласти певні технічні обмеження:

$$\left\{ \begin{array}{l} \forall p \in \{P_i \mid j_i \in J\}, \exists w_k : j_i \in J_k \wedge p \in P_k \\ P_k \subseteq P_i, \forall i : j_i \in J_k, \forall k : w_k \in W \\ \sum_{k: p \in \{P_k \mid w_k \in W\} \wedge j_i \in \{J_k \mid w_k \in W\}} 1 \leq 1, \forall p \in P \end{array} \right. . \quad (4.9)$$

Перше обмеження забезпечує безперервність просування кожного струменя вагонопотоку, тобто забезпечує виконання такої умови, що на кожній ділянці, яка входить у маршрут струменя, має існувати хоча б один напрямок, до складу якого включений цей струмінь.

Друге обмеження забезпечує цілісність напрямку на всьому маршруті прямування. Це означає, що кожен струмінь, що входить у цей напрямок, не може покинути цей напрямок, а просувається у його складі по всьому маршруту напрямку. Математично це виражено так, що множина ділянок маршруту напрямку має бути підмножиною ділянок маршруту кожного струменя, який включений у цей напрямок.

Третє обмеження забороняє кожному струменю одночасне просування по ділянці у складі кількох різних напрямків. Математично це виражено так, що для кожної ділянки сумарна кількість напрямків, до складу яких включений цей струмінь і до маршруту яких включена ця ділянка, не може перевищувати 1.

4.4 Проведення моделювання із застосуванням уточненої оптимізаційної моделі розрахунку ПФП

Для моделювання розроблено процедуру з використанням математичного апарату генетичних алгоритмів. Мережею для розрахунку ПФП вибрано абстрактний залізничний полігон, схематично зображений на рисунку 4.4.

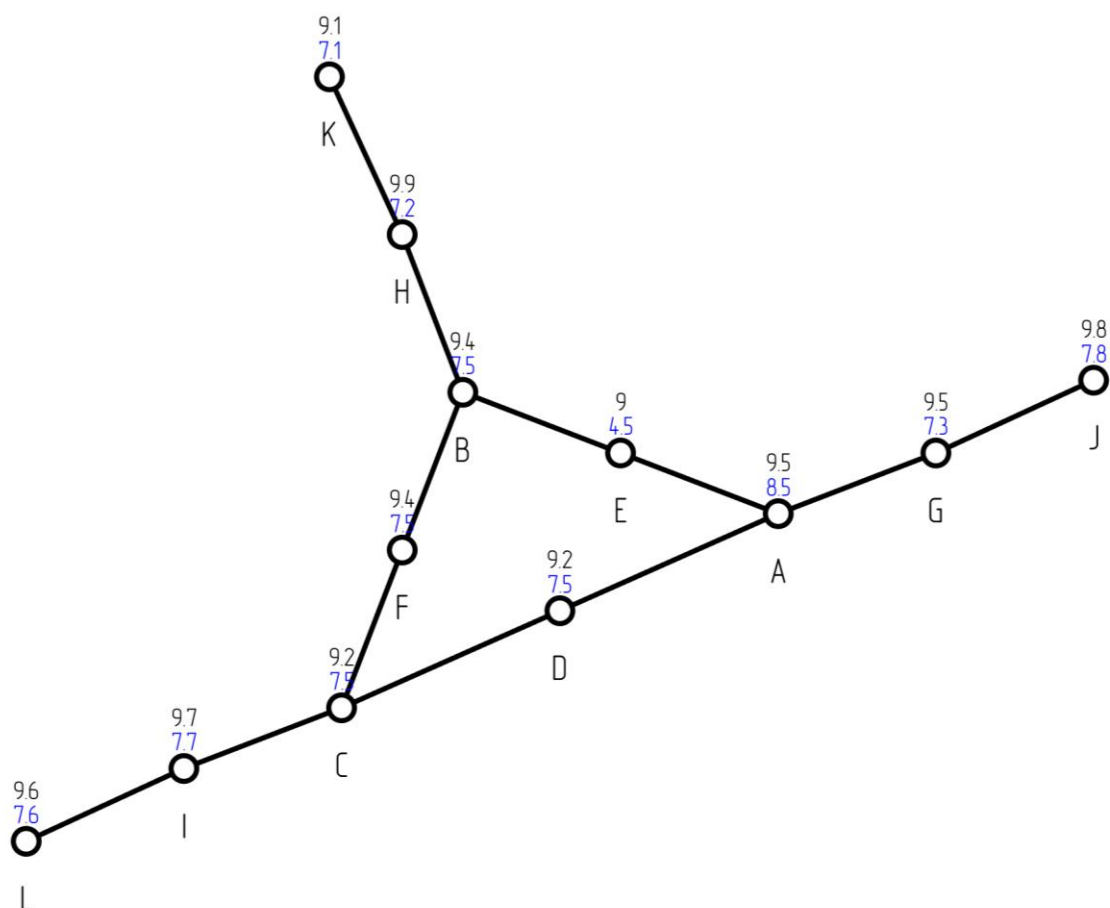


Рисунок 4.4 – Граф залізничної мережі полігона

Цей рисунок демонструє параметри інфраструктури досліджуваного полігона: величини параметрів накопичення на технічних станціях (чорним кольором), час, необхідний для переробки одного вагона (не включаючи процес накопичення, позначений синім кольором). Параметри технологічного процесу на технічних станціях мережі, які також є вихідними даними для розрахунку ПФП, наведені в таблиці 4.1.

Таблиця 4.1 – Параметри технологічного процесу на станціях полігона

Номер	Станція	Параметр накопичення, год	Витрати часу на переробку транзитного вагона, год
1	A	9.5	8.5
2	B	9.4	7.5
3	C	9.2	7.5
4	D	9.2	7.5
5	E	9.0	4.5
6	F	9.4	7.5
7	G	9.5	7.3
8	H	9.9	7.2
9	I	9.7	7.7
10	J	9.8	7.8
11	K	9.1	7.1
12	L	9.6	7.6

На рисунку 4.5 наведена топологія і потужності розрахункових струменів вагонопотоків на фоні графа мережі.

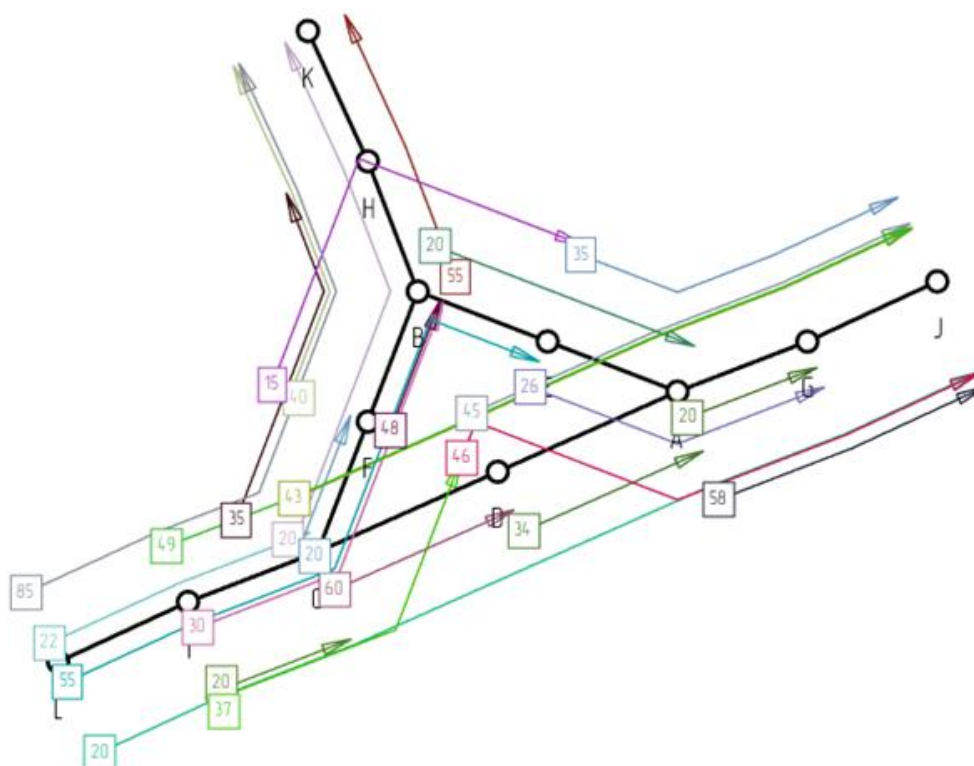


Рисунок 4.5 – Розрахункові потужності струменів вагонопотоків

Потужності струменів вагонопотоків, використовувані як вихідні дані для розрахунку ПФП, наведені в таблиці 4.2.

Таблиця 4.2 – Параметри струменів вагонопотоків

Номер струменя	Струмінь	Потужність, ваг	Номер струменя	Струмінь	Потужність, ваг	Номер струменя	Струмінь	Потужність, ваг	Номер струменя	Струмінь	Потужність, ваг	Номер струменя	Струмінь	Потужність, ваг
1	LJ	20	6	IC	20	11	BK	55	16	BA	20	21	AG	20
2	LC	22	7	CH	35	12	DA	34	17	EG	26	22	LK	85
3	IB	30	8	IF	37	13	EJ	35	18	CD	60	23	IJ	49
4	CK	20	9	CJ	43	14	AJ	58	19	CF	20	24	FJ	46
5	FK	40	10	DJ	45	15	FE	15	20	FB	48	25	LE	55

Полігон налічує 12 станцій і має розгалужену мережеву структуру, також цим полігоном просуваються 25 струменів вагонопотоків.

Задача розрухунку ПФП полягає в тому, щоб знайти найбільш вигідну комбінацію струменів, що відповідає мінімуму загальних витрат вагоно-годин на накопичення вагонопотоків і їх переробку по ходу просування мережею до станцій призначення. Розроблена цільова функція моделі (4.8) саме і призначена для оцінювання поточних варіантів плану в процесі розрахунку за класичним критерієм витрат вагоно-годин.

Ця задача являє собою значну комбінаторну складність, для її розв'язання розроблено оптимізаційну процедуру на основі застосування математичного апарату генетичних алгоритмів.

У таблиці 4.3 і на рисунку 4.6 показані результати обчислень ПФП за стандартною моделлю, тобто без урахування впливу зростання витрат на обробку вагонопотоків на технічних станціях під час перевантажених режимів. Ці результати необхідні для подальшого порівняння з результатами, отриманими на основі вдосконаленої моделі.

Таблиця 4.3 – Результати розрахунку ПФП на основі типової моделі

Номер	Струмені у складі напрямків	Початкова станція	Кінцева станція	Маршрут	Потужність призначення	Кількість вагонів, для яких маршрут є кінцевим	Кількість вагонів, перероблюваних на кінцевій станції	Параметр накопичення призначення	Витрати часу на переробку одного вагона на кінцевій станції маршруту	Витрати на переформування	Витрати на накопичення	У тому числі додаткові витрати на переформування внаслідок перевантаження станції
1	EG,AG	A	G	A,G	46	46	0	9.5	7.3	0	522.5	0
2	DJ,EJ, AJ	A	J	A,G,J	138	138	0	9.5	7.8	0	522.5	0
3	FE,BA	B	E	B,E	35	15	20	9.4	4.5	90	517	0
4	CK,FK, BK	B	K	B,H,K	115	115	0	9.4	7.1	0	517	0
5	CD	C	D	C,D	60	60	0	9.2	7.5	0	506	0
6	IB,CK,I F, CF	C	F	C,F	107	57	50	9.2	7.5	375	506	0
7	CH	C	H	C,F,B, H	35	35	0	9.2	7.2	0	506	0
8	LJ,CJ,I J	C	J	C,D,A, G,J	112	112	0	9.2	7.8	0	506	0
9	DJ,DA	D	A	D,A	79	34	45	9.2	8.5	382.5	506	0
10	EJ,EG, BA	E	A	E,A	81	20	61	9	8.5	518.5	495	8.64
11	IB,CK, FK, FE,FB	F	B	F,B	153	78	75	9.4	7.5	562.5	517	140.63
12	FJ	F	J	F,B,E, A,G,J	46	46	0	9.4	7.8	0	517	0
13	IB,IC,IF , IJ	I	C	I,C	136	20	11 6	9.7	7.5	870	533.5	571.71
14	LJ,LC	L	C	L,I,C	42	22	20	9.6	7.5	150	528	0
15	LE	L	E	L,I,C,F ,B,E	55	55	0	9.6	4.5	0	528	0
16	LK	L	K	L,I,C,F ,B,H,K	85	85	0	9.6	7.1	0	528	0
	Разом									2948.5	8255.5	720.98
	Значення цільової функції										11204	
	Значення цільової функції після урахування додаткових витрат, пов'язаних із перевантаженням станцій										11924.98	

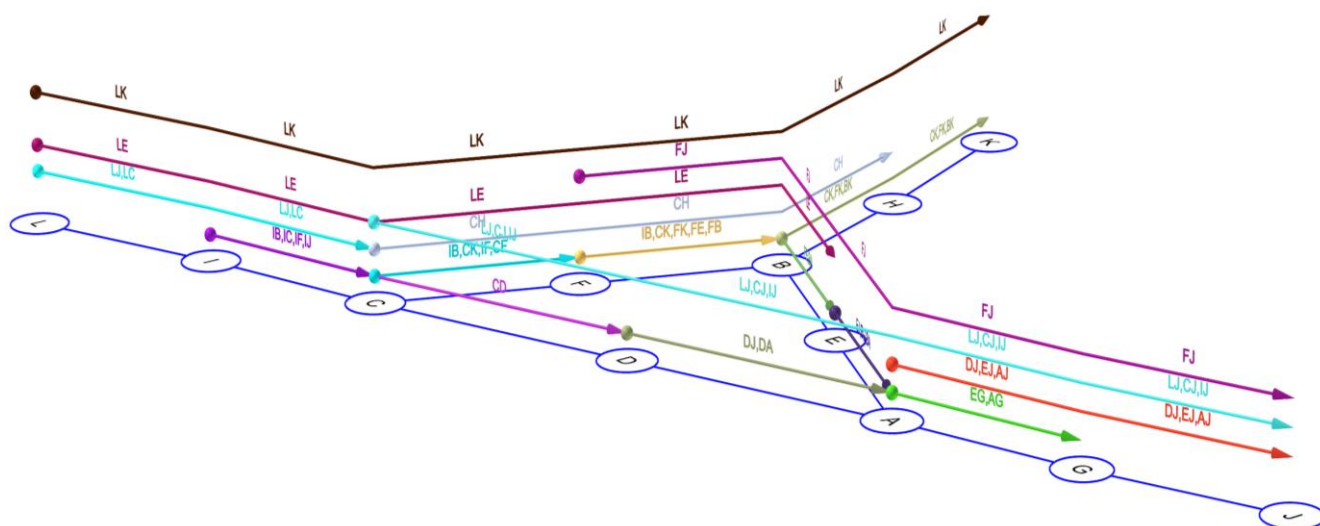


Рисунок 4.6 – Тривимірна інтерпретація отриманого варіанта ПФП на основі типової моделі

Обчислення із застосуванням функції (4.7) у складі уточненої моделі, що враховує зростання витрат вагоно-годин, дає змогу отримати оновлені результати, які показують вплив запропонованої функції змінного коефіцієнта на витрати вагоно-годин в умовах перевантаження технічних станцій. Отримані дані можуть бути використані для подальшого аналізу і вдосконалення моделі ПФП. Результати подані на рисунку 4.7 і в таблиці 4.4.

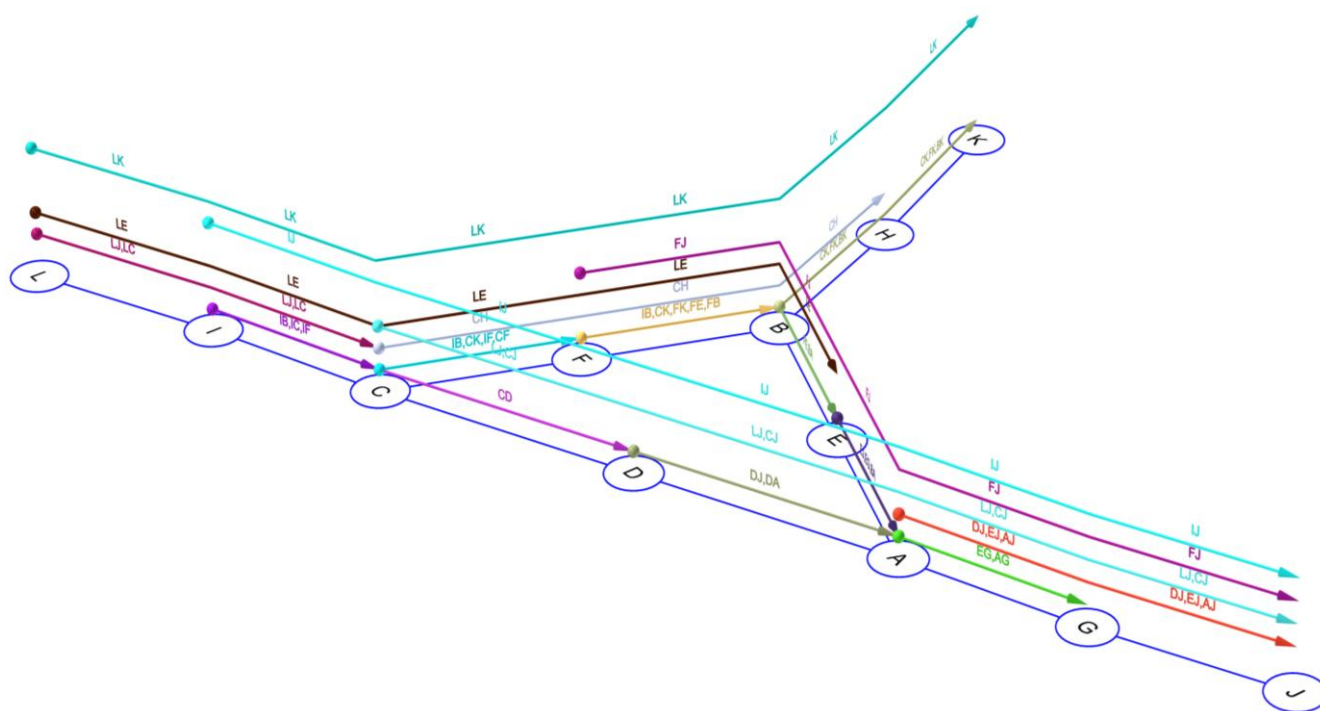


Рисунок 4.7 – Тривимірна інтерпретація отриманого варіанта ПФП

Таблиця 4.4 – Результати розрахунку ПФП із урахуванням ефекту перевантаження

Номер	Струмені у складі напрямків	Початкова станція	Кінцева станція	Маршрут	Потужність призначення	Кількість вагонів, для яких маршрут є кінцевим	Кількість вагонів, перероблених на кінцевій станції	Параметр накопичення призначення	Витрати часу на переробку одного вагона на кінцевій станції маршруту	Витрати на перетворення	Витрати на накопичення	У тому числі додаткові витрати на перетворення внаслідок перевантаження станції
1	EG, AG	A	G	A,G	46	46	0	9.5	7.3	0	522.5	0
2	DJ,EJ, AJ	A	J	A,G,J	138	138	0	9.5	7.8	0	522.5	0
3	FE,BA	B	E	B,E	35	15	20	9.4	4.5	90	517	0
4	CK,FK, BK	B	K	B,H,K	115	115	0	9.4	7.1	0	517	0
5	CD	C	D	C,D	60	60	0	9.2	7.5	0	506	0
6	IB,CK,I F,CF	C	F	C,F	107	57	50	9.2	7.5	375	506	0
7	CH	C	H	C,F,B,H	35	35	0	9.2	7.2	0	506	0
8	LJ,CJ	C	J	C,D,A,G, J	63	63	0	9.2	7.8	0	506	0
9	DJ,DA	D	A	D,A	79	34	45	9.2	8.5	382.5	506	0
10	EJ,EG, BA	E	A	E,A	81	20	61	9	8.5	527.14	495	8.64
11	IB,CK, FK,FE, FB	F	B	F,B	153	78	75	9.4	7.5	703.13	517	140.63
12	FJ	F	J	F,B,E,A, G,J	46	46	0	9.4	7.8	0	517	0
13	IB,IC,IF	I	C	I,C	87	20	67	9.7	7.5	502.5	533.5	0
14	IJ	I	J	I,C,D,A,G ,J	49	49	0	9.7	7.8	0	533.5	0
15	LJ,LC	L	C	L,I,C	42	22	20	9.6	7.5	150	528	0
16	LE	L	E	L,I,C,F,B, E	55	55	0	9.6	4.5	0	528	0
17	LK	L	K	L,I,C,F,B, H,K	85	85	0	9.6	7.1	0	528	0
Разом										2730.27	8789	149.27
Значення цільової функції											11519.27	
Сумарні витрати вагоно-годин за варіантом ПФП, отриманим без урахування додаткових витрат, пов'язаних із перевантаженням станції, після їх урахування											11924.98	
Економія вагоно-годин											405.714	
Економія, %											3.522	

За отриманими даними, загальна кількість вагоно-годин для варіанта плану без урахування впливу перевантаженості станцій на невиробничий простій вагонів становить 11204 ваг. год. Після врахування цього фактора загальний показник зростає до 11924,98 ваг. год. Водночас варіант плану, який спочатку враховував вплив перевантаженості станцій, показує результат 11519,27 ваг. год. Отже,

уточнення моделі дало змогу знизити реальні витрати вагоно-годин на 405,71 ваг. год, що відповідає 3,5 % загальних витрат на накопичення та переформування поїздів. Це свідчить про те, що додавання запропонованої функції до моделі ПФП підвищило її точність і сприяло оптимізації плану.

Запропонований підхід для врахування відмінностей у рівні витрат вагоно-годин на переробку вагонопотоків можна розглядати як захід, спрямований на зменшення епістемічної невизначеності, зокрема такої її різновидності, як модельна невизначеність. Такий підхід, застосований на стратегічному рівні управління, є надзвичайно ефективним, оскільки одночасно дає змогу знижувати рівень невизначеності на всіх нижчих рівнях управління ЗТС. Врахування відмінностей у витратах також сприяє підвищенню точності планування та операційної діяльності, що є критичним для забезпечення стабільності та надійності транспортних процесів.

Отже, запропонований підхід для уточнення моделі за рахунок врахування варіативності витрат дає змогу не лише покращити результати роботи на кожному окремому рівні управління, а й забезпечує узгодженість і адаптивність рішень на всіх етапах, від стратегічного до тактичного і операційного. Це знижує ймовірність помилок і дає змогу краще врахувати складність реальних умов функціонування системи.

4.5 Удосконалення технології управління місцевою роботою дільниці в умовах невизначеності

Іншим прикладом класичного завдання з управління експлуатаційною роботою, яке зазвичай вирішують без врахування факторів невизначеності, є завдання, що полягає в побудові плану роботи збірних поїздів на залізничній ділянці. Однак у реальних умовах експлуатації необхідно враховувати коливання обсягів місцевої роботи і вагонопотоків, оскільки такі фактори мають суттєвий вплив на ефективність функціонування залізничної системи. Ігнорування цих коливань

призводить до зниження якості організації місцевої роботи на ділянці та може зробити планування практично беззмістовним.

Невизначеність обсягів вагонопотоків і нерегулярність місцевих вантажних операцій ускладнюють забезпечення стабільності в роботі збірних поїздів. Недооцінювання цих факторів призводить до розбалансованості планів, неефективного використання ресурсів і затримок у виконанні операцій. Тому планування, що не враховує флуктуацій у місцевій роботі, стає ненадійним інструментом управління, знижуючи загальну ефективність транспортної системи.

Отже, для підвищення якості управління експлуатаційною роботою необхідно впроваджувати підходи, що враховують невизначеність і варіативність умов, аби зробити планування більш адаптивним і релевантним до реальних сценаріїв експлуатації.

Місцева робота на залізничних дільницях здійснювана із залученням збірних поїздів, які обслуговують вагони, призначені для місцевих операцій. Основне завдання планування полягає у створенні ефективного графіка роботи таких поїздів для оптимізації ресурсів і мінімізації витрат вагоно-годин. Традиційно процес планування ґрунтується на стабільних обсягах вантажно-розвантажувальних робіт. Однак у реальності ці показники можуть змінюватися.

Фактори, такі як сезонні коливання, непередбачувані затримки чи зміни у вантажних запитах, можуть спричиняти суттєві відхилення. Це робить початковий план, базований на незмінних обсягах, не тільки неефективним, а іноді навіть непридатним до виконання. Класичні методи, що ігнорують подібну варіативність, не забезпечують належної гнучкості.

Отже, актуальним стає завдання розроблення такого підходу, який давав би змогу враховувати можливі зміни у вантажопотоках. Це потребує застосування гнучких методик, здатних адаптуватися до реальних умов і переглядати плани в разі відхилень від прогнозованих обсягів.

Планування роботи збірних поїздів на залізничних дільницях традиційно здійснюється на основі постійних і передбачуваних обсягів місцевої роботи, зокрема навантаження і вивантаження вагонів. Однак у реальних умовах ці обсяги можуть

суттєво змінюватися, що робить сучасні методи планування неадекватними для досягнення максимальної ефективності. Неврахування таких коливань призводить до нерационального використання ресурсів, порушення графіків і збільшення операційних витрат.

Коливання в обсягах місцевої роботи можуть бути значними, навіть якщо вони залишаються в межах допустимих значень. Це означає, що збірні поїзди мають бути сплановані з урахуванням можливих змін у кількості вагонів, які підлягають обробці на кожній станції. Відсутність таких заходів може призвести до накопичення вагонів на одних станціях і нестачі на інших, що суттєво погіршує якість роботи.

Завдання планування роботи збірних поїздів в умовах невизначеності полягає в тому, щоб урахувати ймовірні коливання вагонопотоків і обсягів місцевих операцій. Традиційні методи, що ігнорують ці фактори, можуть лише частково відповідати реальним потребам залізничної системи, особливо під час пікових періодів або раптових змін у навантаженні.

Тому планування роботи збірних поїздів має передбачати варіативність обсягів місцевої роботи, аби забезпечити гнучкість і надійність перевезень. Використання сучасних підходів, що враховують невизначеність і коливання обсягів, дозволить не тільки підвищити точність планування, а й зменшити експлуатаційні витрати, скоротити простої вагонів і покращити загальну ефективність роботи залізничної системи.

Отже, необхідність розроблення більш стійких і адаптивних методів планування та управління місцевою роботою, здатних урахувати змінність і невизначеність умов, стає очевидною.

Розглянемо залізничну ділянку, яка простягається між станціями А та F, з проміжними станціями В, С, D і Е, обслуговуваних збірними поїздами (рис. 4.8).



Рисунок 4.8 – Схема залізничної дільниці місцевої роботи

Місцева робота на цих станціях здійснюється шляхом перевезення вантажів, але в сучасних умовах спостерігаються значні добові коливання обсягів навантаження і вивантаження. Ці коливання можуть бути спричинені нерівномірною діяльністю підприємств, які користуються послугами залізниці, а також певними недоліками в організації місцевої роботи.

За ринкових умов ці коливання є природним явищем, на відміну від стабільних планових економік, де такі відхилення мінімізовано. Натомість система організації місцевої роботи на залізниці залишається жорстко прив'язаною до графіків руху поїздів, які діють протягом усього року без змін. Хоча існують альтернативні методи організації місцевої роботи, вони залишаються додатковими до основної технології, що спирається на збірні поїзди.

Класичний підхід для планування часто базований на історичних даних і статистичних моделях, що намагаються прогнозувати майбутні обсяги вантажних операцій. Однак такі підходи можуть бути надто складними, оскільки ймовірнісні параметри постійно змінюються, що знижує їхню ефективність.

Оскільки дискретні моделі оптимізації зі стохастичними змінними важко застосовувати через складність їх оптимізації, доцільно звернути увагу на стохастичну робастну оптимізацію [79]. Цей підхід поєднує переваги ймовірнісного моделювання з можливістю врахування невизначеностей, щоб ефективніше реагувати на варіативність обсягів місцевої роботи. Застосування стохастичної робастної оптимізації на рівні планування збірних поїздів допоможе забезпечити більш гнучке й надійне планування, що підвищить ефективність всієї системи перевезень.

Стохастична робастна оптимізація — це напрям оптимізації для вирішення проблем, де присутні значні невизначеності та коливання вхідних даних. На відміну від класичних підходів, цей напрям не обмежений простим пошуком оптимальних рішень для фіксованих умов. Він спрямований на врахування ймовірнісних сценаріїв і отримання рішень, які будуть стійкими до відхилень від прогнозованих параметрів. Це означає, що під час планування роботи збірних поїздів можна передбачити коливання обсягів навантаження і вивантаження, збої у графіках руху та інші фактори, що створюють невизначеність.

Застосування стохастичної робастної оптимізації дає змогу побудувати план, адаптований до таких варіацій, зберігаючи ефективність навіть за несприятливих умов. Це зменшує ризик виникнення критичних ситуацій, які б потребували частого перегляду планів, і відповідно скорочує експлуатаційні витрати. Крім того, цей підхід сприяє кращій координації між різними елементами системи, оскільки дає змогу більш гнучко реагувати на непередбачувані зміни в обсягах вантажів і дотримуватися графіка, забезпечуючи стабільність перевезень.

Зокрема, у випадку залізничних перевезень, де важлива точність і своєчасність доставлення, стохастична робастна оптимізація дає змогу створити баланс між ефективністю використання ресурсів і надійністю системи.

Для ефективного вирішення завдання планування роботи збірних поїздів для забезпечення місцевої роботи на дільниці запропоновано метод, що одночасно поєднує робастний і стохастичний підходи оптимізації.

У запропонованому підході вирішують завдання планування місцевої роботи на залізничних дільницях через пошук робастного рішення з урахуванням стохастичних факторів. Спочатку кількість вагонів на кожній станції задають у вигляді інтервальних чисел, що дає змогу врахувати можливі коливання цих параметрів у межах певних інтервалів. Однак для більш глибокого врахування невизначеності і пошуку оптимального рішення, що є стійким до різних сценаріїв, до інтервальних змінних додають ймовірнісну складову.

Кожній змінній, заданій інтервальними числами, призначено відповідний ймовірнісний розподіл, який відображує ймовірність появи певного значення

всередині інтервалу. На основі цього розподілу можна оцінити ймовірність виникнення конкретної комбінації значень параметрів, використовувану для моделювання можливих сценаріїв. Пошук робастного рішення полягає у виборі такого варіанта плану, який залишається ефективним за різних сценаріїв, однак головним елементом цього підходу є відбір рішень лише серед тих варіантів, імовірність реалізації яких перевищує певний визначений рівень.

Отже, алгоритм спочатку моделює різні сценарії розвитку подій, оцінюючи ймовірність кожної комбінації змінних. Якщо ймовірність комбінації є нижчою за встановлений поріг, такий сценарій вважають неробастним і виключають із подальшого розгляду, щоб сфокусуватися лише на тих рішеннях, які мають високий шанс реалізації в реальних умовах і водночас залишаються стійкими до можливих відхилень у параметрах. У результаті знайдене робастне рішення є не тільки оптимальним, але й практично реалістичним, оскільки ймовірність його досягнення в реальних умовах є достатньо високою для забезпечення надійної роботи системи.

Вигляд статистичного розподілу імовірностей, яке може відповідати, наприклад, інтервальному числу $[30, 50]$, що є кількістю навантажених місцевих вагонів на станції, наведений на рисунку 4.9.

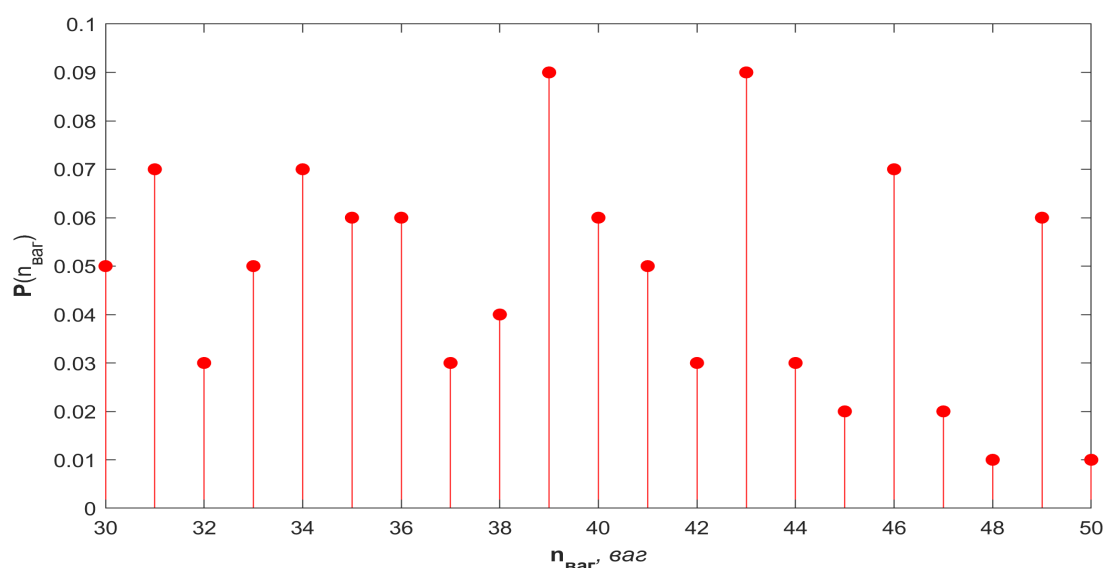


Рисунок 4.9 – Приклад можливого статистичного розподілу ймовірностей для випадкової величини «кількість вагонів», яка подана як інтервальне число $[30; 50]$

Вибір біноміального розподілу для моделювання кількості вагонів, які можуть бути або завантаженими або незавантаженими до моменту прибуття збірного поїзда, зумовлений природою цієї дискретної події. Оскільки кожен вагон має дві можливості — бути завантаженим або незавантаженим, ця подія є теоретично незалежною для кожного вагона (тим паче, що на кожній станції місцевої роботи працюють вантажні фронти і під'їзні колії різних підприємств), біноміальний розподіл є таким, що найбільш прийнятний для опису ймовірностей таких результатів.

Принцип побудови біноміального розподілу на основі параметрів інтервального числа полягає у визначенні ймовірностей для кожного з можливих результатів, виходячи з середньої кількості вагонів, що можуть бути завантажені чи незавантажені, і їхньої варіації. Якщо, наприклад, інтервальні числа задають межі можливих кількостей завантажених вагонів, то біноміальний розподіл можна налаштувати за допомогою параметрів успішних спроб (кількість вагонів) і ймовірності завантаження кожного вагона. Ймовірність завантаження вагона визначають як середнє значення кількості вагонів у межах інтервального числа, поділене на максимальну кількість вагонів, яку і можна інтерпретувати як загальну кількість спроб.

Отже, біноміальний розподіл дає змогу адекватно моделювати ймовірності різних комбінацій завантаження вагонів, що є основним для забезпечення точності в розрахунках і плануванні в умовах невизначеності. На рисунку 4.10 наведений біноміальний закон розподілу ймовірностей, сформований на основі інтервального числа $n_{\text{ваг}} = [30, 40]$, що являє собою кількість навантажених місцевих вагонів на станції.

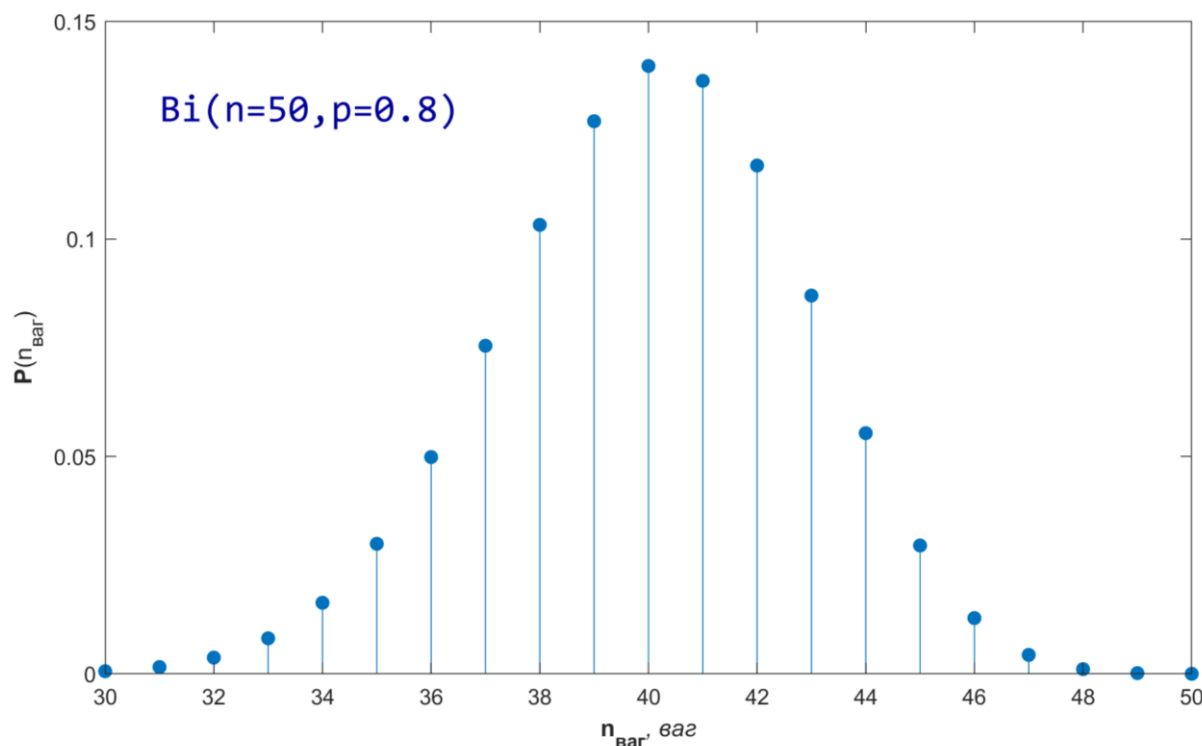


Рисунок 4.10 – Приклад розподілу ймовірностей, поданого біноміальним законом розподілу випадкової величини «кількість вагонів», заданої інтервальним числом $n_{\text{vag}} = [30, 40]$

Отже, біноміальний закон розподілу ймовірності в застосуванні до цієї моделі можна записати як

$$P(m_i | b_i, p_i) = \binom{b_i}{m_i} p_i^{m_i} (1 - p_i)^{b_i - m_i}, \quad (4.10)$$

де m_i – поточне значення кількості вагонів, що можуть бути завантажені на i -й станції, для якого обчислюють ймовірність;

b_i – максимальна кількість вагонів, які можуть бути завантажені на цій станції до прибуття збірного поїзда, ця величина задана правою (верхньою) межею інтервального числа;

p_i – імовірність завантаження кожного вагона в разі рівноімовірного навантаження кожного вагона, її доцільно обчислювати як відношення середнього значення інтервального числа до його максимального значення, у такий спосіб її можна обчислити як $\frac{a_i + b_i}{2 \cdot b_i}$, де a_i – мінімальна кількість вагонів, тобто ліва (нижня) межа інтервального числа;

$\binom{b_i}{m_i}$ – біноміальний коефіцієнт, який можна інтерпретувати як кількість способів, якими можна навантажити m_i з b_i вагонів.

4.6 Формування математичної моделі

Необхідно сформулювати оптимізаційну моделі управління, яка реалізує цей підхід. За критерій оптимізації, як і в попередній задачі, доцільно взяти витрати вагоно-годин. Цільову функцію можна сформулювати так [80]:

$$\begin{aligned}
 B(x, m_{неп}^{нав}, m_{пар}^{нав}, m_{неп}^{вив}, m_{пар}^{вив}, \tau_x^{пр.зб}, \tau_{\neg x}^{пр.зб}, \tau_x^{від.зб}, \tau_{\neg x}^{від.зб}, \tau_x^{ман}, \tau_{\neg x}^{ман}) = \\
 \min_x \left\{ \max_{(m_{неп}^{нав}, m_{пар}^{нав}, m_{неп}^{вив}, m_{пар}^{вив})} \left\{ \sum_{i=1}^n (m_{i,x}^{вив} + m_{i,x}^{*нест}) (\tau_{i,x}^{від.зб} - \tau_{i,\neg x}^{пр.зб}) + \right. \right. \\
 + \sum_{i=1}^n (m_{i,x}^{нав} + m_{i,x}^{*надл}) (24 - (\tau_{i,x}^{пр.зб} - \tau_{i,\neg x}^{від.зб})) + \\
 + \sum_{i=1}^n (m_{i,x}^{вив} + m_{i,x}^{*нест} + m_{i,x}^{нав} + m_{i,x}^{*надл}) \tau_{i,x}^{ман} + \\
 \left. \left. + \sum_{i=1}^n (m_{i,x}^{вив} + m_{i,x}^{*нест} + m_{i,\neg x}^{вив} + m_{i,\neg x}^{*нест}) \tau_{i,\neg x}^{ман} \right\} \right\}
 \end{aligned} \quad , \quad (4.11)$$

де x – це булева керуюча змінна, яка відповідає одній із двох схем прокладання пари збірних поїздів, кожену зі схем будемо ідентифікувати за напрямком першого збірного поїзда, тож булеву змінну можна інтерпретувати так: 0 – парний напрям (і відповідна схема), 1 – непарний напрям;

$\mathbf{m}_{неп}^{нав}, \mathbf{m}_{пар}^{нав}, \mathbf{m}_{неп}^{вив}, \mathbf{m}_{пар}^{вив}$ – змінні вектори (на що й вказує жирний шрифт), які містять поточні значення параметрів місцевої роботи, подані інтервальними числами, такі як обсяги навантаження в непарному і парному напрямках і обсяги вивантаження в непарному і парному напрямках по станціях місцевої роботи відповідно (у вагонах);

$m_{i,x}^{нав}$ – елемент змінного вектора, що відповідає поточному значенню кількості вагонів, що навантажені на i -й станції і відправлятимуться в напрямку x (на відповідну дільничну станцію), або в зворотному напрямку, якщо другий індекс $\neg x$;

$m_{i,x}^{вив}$ – елемент змінного вектора, що відповідає кількості вагонів, які прибули до i -ї станції з напрямку x (з відповідної дільничної станції) або у зворотному напрямку, якщо другий індекс $\neg x$;

$m_{i,x}^{*нест}, m_{i,x}^{*надл}$ – кількість порожніх вагонів, які прибудуть до i -ї станції з напрямку x (або зі зворотного напрямку, якщо другий індекс $\neg x$) з метою компенсації нестачі, і кількість порожніх вагонів, які відправляться з i -ї станції в напрямку x (або зі зворотного напрямку, якщо другий індекс $\neg x$) з метою усунення надлишку на станції, ці змінні позначені зірочкою, тому що вони залежать від змінних моделі, але ця залежність є складною, адже ці змінні є результатом оптимізації вкладеної оптимізаційної моделі, наприклад лінійного програмування за типом транспортної задачі, мета якої раціонально розподілити порожні вагони по дільниці;

$(\tau_{i,x}^{пр.зб} - \tau_{i,\neg x}^{від.зб})$ – тривалість часового інтервалу між прибуттям першого збірного поїзда до i -ї станції і відправленням другого;

$(\tau_{i,x}^{від.зб} - \tau_{i,\neg x}^{пр.зб})$ – тривалість часового інтервалу між відправленням першого збірного поїзда з i -ї станції і прибуттям другого;

$\tau_{i,x}^{ман}, \tau_{i,-x}^{ман}$ – тривалість маневрових операцій на i -й станції з першим і другим збірними поїздами відповідно;

n – кількість станцій місцевої роботи (проміжних станцій) на дільниці.

Перший доданок у цільовій функції відображує сукупні витрати вагоно-годин у часових проміжках між відправленням першого збірного поїзда та прибуттям другого на кожній із проміжних станцій. Другий доданок стосується витрат вагоно-годин у періодах між відправленням другого поїзда і прибуттям першого. Третій і четвертий доданки враховують витрати під час обробки першого та другого збірних поїздів на кожній із станцій.

Застосування операторів $\min$ і $\max$ у цільовій функції реалізує принцип мінімаксу, спрямований на пошук рішення, яке мінімізує найбільші потенційні негативні наслідки невизначеності. Іншими словами, замість оптимізації для одного фіксованого сценарію враховують усі можливі варіації параметрів, що можуть виникнути через коливання вхідних даних. Мета полягає в тому, щоб знайти рішення, яке виявиться «оптимальним серед найгірших», тобто мінімізувати втрати в найгіршому можливому випадку.

У контексті побудови надійного плану для роботи збірних поїздів, мінімаксна стратегія дає змогу зменшити максимальні можливі втрати або витрати, спричинені варіаціями в таких параметрах, як обсяги перевезень. На відміну від звичайної оптимізації, де метою було б мінімізація середніх значень витрат або часу, цей підхід забезпечує стійкість рішень навіть у найбільш несприятливих умовах.

Окрім того, на змінні моделі, включаючи як керуючі, так і допоміжні, слід накласти обмеження, що гарантують відповідність певним технічним і технологічним вимогам. Хоча для кожного окремого параметра, наприклад обсягів навантаження на станціях, визначено конкретні межі коливань, ці межі можуть бути також задані для агрегованих показників, таких як загальний обсяг навантаження в певному напрямку. Такі обмеження для моделі можна сформулювати як

$$\left\{ \begin{array}{l} m_{нав.пар}^{\Sigma \min} \leq \sum_{i=1}^n m_i^{нав.пар} \leq m_{нав.пар}^{\Sigma \max} \\ m_{нав.неп}^{\Sigma \min} \leq \sum_{i=1}^n m_i^{нав.неп} \leq m_{нав.неп}^{\Sigma \max} \\ m_{вив.пар}^{\Sigma \min} \leq \sum_{i=1}^n m_i^{вив.пар} \leq m_{вив.пар}^{\Sigma \max} \\ m_{вив.неп}^{\Sigma \min} \leq \sum_{i=1}^n m_i^{вив.неп} \leq m_{вив.неп}^{\Sigma \max} \end{array} \right. , \quad (4.12)$$

де $m_i^{нав.пар}, m_i^{нав.неп}, m_i^{вив.пар}, m_i^{вив.неп}$ – поточні значення навантаження і вивантаження і парному і непарному напрямках відповідно за i -ю станцією;

$m_{нав.пар}^{\Sigma \min}, m_{нав.неп}^{\Sigma \min}, m_{вив.пар}^{\Sigma \min}, m_{вив.неп}^{\Sigma \min}, m_{нав.пар}^{\Sigma \max}, m_{нав.неп}^{\Sigma \max}, m_{вив.пар}^{\Sigma \max}, m_{вив.неп}^{\Sigma \max}$ – мінімальні і максимальні сумарні значення навантаження і вивантаження і парному і непарному напрямках відповідно.

Окрім того, на проміжній станції, розташованій найближче до дільничної станції, де з'єднуються збірні поїзди, має бути забезпечена можливість виконання подвійних вантажних операцій із вагонами у проміжках між прибуттями збірних поїздів. Це означає, що вагони, які прибули з першим збірним поїздом у завантаженому (а іноді і порожньому) стані, мають пройти процедуру розвантаження (за необхідності) і повторного навантаження до прибуття другого збірного поїзда, з яким вони будуть з'єднані:

$$\left(\tau_{i,x}^{від.зб} - \tau_{i,-x}^{пр.зб} \right) \geq T_i^{ван.оп.}, \quad i = \begin{cases} 1, & \text{якщо } x = 0 \\ n, & \text{якщо } x = 1 \end{cases} \quad (4.13)$$

де $T_i^{ван.оп.}$ – мінімальна тривалість здійснення вантажних операцій (у тому числі подвійних, якщо до станції надходять навантажені вагони) на i -й станції.

Потрібно забезпечити дотримання технологічних обмежень щодо максимальної кількості вагонів у складі збірних поїздів. Оскільки кількість вагонів у

поїзді може змінюватися на кожному перегоні залежно від значень керуючих змінних, ці обмеження слід урахувати. У рамках моделі ці обмеження, поділені на непарний і парний напрямки, можна сформулювати так:

$$\left\{ \begin{array}{l} \sum_{\substack{i=y \\ i \leq N-2}}^{N-2} m_{i,d}^{виб} + \sum_{\substack{i=2 \\ i < N}}^y m_{i-1,d}^{нав} + \sum_{p=1}^N \sum_{q=1}^N m_{p,q}^{пор} (p \leq y)(q > y) \leq m^{норм}, \quad \forall y=1 \dots N-1, d=1 \\ \sum_{\substack{i=3 \\ i \leq y}}^y m_{i-2,d}^{виб} + \sum_{\substack{i=y \\ i < N}}^{N-1} m_{i-1,d}^{нав} + \sum_{p=1}^N \sum_{q=1}^N m_{p,q}^{пор} (p \geq y)(q < y) \leq m^{норм}, \quad \forall y=2 \dots N, d=0 \end{array} \right. , (4.14)$$

де N – кількість станцій на дільниці включно з дільничними станціями;

y – параметр, що набуває значення номерів станцій на дільниці (усі станції пронумеровані послідовно включно з дільничними станціями), тобто він перебирає номери станцій, із яких збірні поїзди відправляються на перегони (для обчислення кількості вагонів у складі поїзда, з якими він вирушає на перегін);

d – параметр, що є напрямком руху по дільниці, 0 – парний, 1 – непарний;

$m^{норм}$ – нормативна кількість вагонів у складі збірного поїзда, прийнята на цій дільниці;

$m_{p,q}^{пор}$ – кількість порожніх вагонів, що передають зі станції p до станції q у порядку регулювальних заходів згідно з поточним планом переміщення порожніх вагонів (який слід перераховувати окремо як вкладену підзадачу за кожної зміни значень змінних моделі).

На заключному етапі формування моделі потрібно реалізувати також і стохастичний підхід. Реалізація стохастичного підходу в рамках цієї моделі є необхідним заходом, мета якого – виключити з області припустимих рішень такі варіанти, імовірнісні показники яких знаходяться поза рівнем встановлених порогових значень.

У контексті комбінаторних задач, де кількість можливих комбінацій може досягати астрономічних величин, одна з основних проблем полягає в ефективному

відсіюванні маловірогідних варіантів. Це особливо актуально, коли необхідно оцінювати ефективність рішень в умовах великої кількості можливих комбінацій. Класичні методи ймовірності можуть бути недостатніми для таких ситуацій, оскільки кількість варіантів є настільки великою, що навіть найімовірніші комбінації мають надзвичайно низькі ймовірності.

У цьому випадку для спрощення аналізу та ухвалення рішень введемо поняття «відносна значущість». Це поняття допомагає оцінити важливість або значущість конкретної комбінації порівняно з іншими можливими варіантами. Визначення відносної значущості полягає у відношенні ймовірності такого варіанта до ймовірності найімовірнішого з усіх можливих варіантів.

Так, для кожної комбінації обчислюють її ймовірність, а потім цю ймовірність порівнюють з ймовірністю найімовірнішого випадку. Відносну значущість визначають як відношення ймовірності комбінації до ймовірності найбільш ймовірної комбінації. Комбінації, чия відносна значущість нижча за встановлений поріг, відсіюють із подальшого аналізу, що дає змогу зосередитися на найбільш значущих варіантах.

Використання відносної значущості як методу відсіювання дає змогу значно спростити обробку комбінацій і фокусується на тих, які мають найбільшу вагу в контексті поставленої задачі. Це прийнятно для обробки ситуацій із великою кількістю комбінацій, де пряме розрахування ймовірностей для кожного варіанта може бути непрактичним або неможливим. Отже, стохастичну складову моделі доцільно реалізувати у вигляді такого обмеження:

$$\prod_{i=1}^n \left(P \left(m_{i, \text{непар}}^{\text{нав}} \mid b_{i, \text{непар}}^{\text{нав}}, \frac{a_{i, \text{непар}}^{\text{нав}} + b_{i, \text{непар}}^{\text{нав}}}{2 \cdot b_{i, \text{непар}}^{\text{нав}}} \right) \times \right. \\ \left. P \left(m_{i, \text{непар}}^{\text{вив}} \mid b_{i, \text{непар}}^{\text{вив}}, \frac{a_{i, \text{непар}}^{\text{вив}} + b_{i, \text{непар}}^{\text{вив}}}{2 \cdot b_{i, \text{непар}}^{\text{вив}}} \right) \times \right. \\ \left. P \left(m_{i, \text{пар}}^{\text{нав}} \mid b_{i, \text{пар}}^{\text{нав}}, \frac{a_{i, \text{пар}}^{\text{нав}} + b_{i, \text{пар}}^{\text{нав}}}{2 \cdot b_{i, \text{пар}}^{\text{нав}}} \right) \times \right. \\ \left. P \left(m_{i, \text{пар}}^{\text{вив}} \mid b_{i, \text{пар}}^{\text{вив}}, \frac{a_{i, \text{пар}}^{\text{вив}} + b_{i, \text{пар}}^{\text{вив}}}{2 \cdot b_{i, \text{пар}}^{\text{вив}}} \right) \right) / P_{\max} \geq \zeta, \quad (4.15)$$

де $a_{i,непар}^{нав}, a_{i,пар}^{нав}, a_{i,непар}^{вив}, a_{i,пар}^{вив}$ – ліва (нижня) границя інтервальних чисел, що являють собою обсяги навантаження в непарному і парному напрямках і вивантаження з непарного і парного напрямків відповідно на i -й станції;

$b_{i,непар}^{нав}, b_{i,пар}^{нав}, b_{i,непар}^{вив}, b_{i,пар}^{вив}$ – права (верхня) границя інтервальних чисел, що являють собою обсяги навантаження в непарному і парному напрямках і вивантаження з непарного і парного напрямків відповідно на i -й станції;

$m_{i,непар}^{нав}, m_{i,пар}^{нав}, m_{i,непар}^{вив}, m_{i,пар}^{вив}$ – поточні значення змінних, що являють собою обсяги навантажених вагонів ву непарному і парному напрямках і вивантаження з непарного і парного напрямків відповідно на i -й станції;

P_{max} – імовірність найбільш імовірної комбінації всіх змінних, що являють собою кількості вагонів, подані як інтервальні числа;

ζ – заданий рівень відносної значущості, який задає мінімальне відношення імовірності поточної комбінації керуючих змінних, що являють собою кількості вагонів, задані інтервальними числами, та імовірності найбільш імовірної їхньої комбінації.

Отже, розроблена оптимізаційна модель включає цільову функцію і систему обмежень.

4.7 Проведення моделювання та аналіз отриманих результатів

Розглянемо дільницю, зображену на рисунку 4.8. Припустимо, що обсяги навантаження та вивантаження вагонів на станціях місцевої роботи можуть змінюватися в межах певних діапазонів, які задані у вигляді інтервальних чисел (табл. 4.5). У передостанньому та останньому стовпчиках таблиці подано мінімальні та максимальні значення для сумарних величин цих параметрів.

Таблиця 4.5 – Обсяги місцевої роботи на станціях дільниці

Проміжні станції	B	C	D	E	$m^{\Sigma\min}$	$m^{\Sigma\max}$
Навантаження в парному напрямку	[0;5]	[0;5]	[0;5]	[0;5]	10	17
Навантаження в непарному напрямку	[13;18]	[4;9]	[0;5]	[15;20]	30	47
Вивантаження в парному напрямку	[0;5]	[0;5]	[1;6]	[1;6]	11	19
Вивантаження в непарному напрямку	[0;5]	[13;18]	[4;9]	[1;6]	25	35

Візьмемо до уваги, що мінімальний час, необхідний для виконання вантажних операцій $T_i^{\text{ван.оп.}}$ на всіх станціях, встановлено на рівні 5 год, а оптимальна кількість вагонів у складі збірного поїзда на цій дільниці складає 50 од. Для оптимізації моделі з цільовою функцією (4.11), використовуючи дані з таблиці 4.5, необхідно розробити спеціалізовану оптимізаційну процедуру. Сучасні пакети оптимізації та середовища для математичних розрахунків, такі як MATLAB, не пропонують готових розв'язків для задач робастної оптимізації, особливо коли ці задачі мають дискретний характер, як у випадку з оптимізацією роботи збірних поїздів.

З огляду на складність цієї задачі, доцільно застосувати генетичні алгоритми [81] як механізм оптимізації. Генетичні алгоритми, що імітують процеси природного відбору та еволюції, є ефективним підходом для вирішення складних комбінаторних проблем, де традиційні методи можуть виявитися менш ефективними. У середовищі MATLAB цей підхід реалізовано шляхом створення спеціальних функцій для виконання операцій селекції, кросинговеру, мутації та оцінювання придатності. Для дискретних задач необхідно розробити спеціалізовані оператори, що забезпечують генерацію та модифікацію рішень відповідно до допустимих значень змінних. Під час еволюції популяція потенційних рішень поступово покращується завдяки відбору найбільш пристосованих індивідів, що дає змогу знайти глобально оптимальне рішення навіть в умовах великого простору можливих варіантів.

Розроблена процедура оптимізації на основі генетичних алгоритмів була реалізована в середовищі MATLAB, забезпечуючи всебічне дослідження простору рішень і дотримання всіх необхідних обмежень. Після завершення розроблення алгоритму проведено моделювання з використанням зазначених вище даних. Це

моделювання дало змогу оцінити ефективність процедури та перевірити адекватність створеної моделі. Результати моделювання, що відображують фінальні значення обсягів місцевої роботи, наведені в таблиці 4.6.

Таблиця 4.6 – Обсяги місцевої роботи, отримані з моделюванням

Проміжні станції	B	C	D	E	Σ
Навантаження в парному напрямку	5	5	2	5	17
Навантаження в непарному напрямку	18	4	5	20	47
Вивантаження в парному напрямку	0	5	6	6	17
Вивантаження в непарному напрямку	3	18	9	1	31
Разом навантаження	23	9	7	25	64
Разом вивантаження	3	23	15	7	48
Нестача порожніх вагонів	20	0	0	18	38
Надлишок порожніх вагонів	0	14	8	0	22

У процесі виконання оптимізаційної процедури також вирішено підзадачу розподілу порожніх вагонів по дільниці. Для обсягів місцевих вантажоперевезень, зазначених у таблиці 4.6, розподіл порожніх вагонів подано на рисунку 4.11.

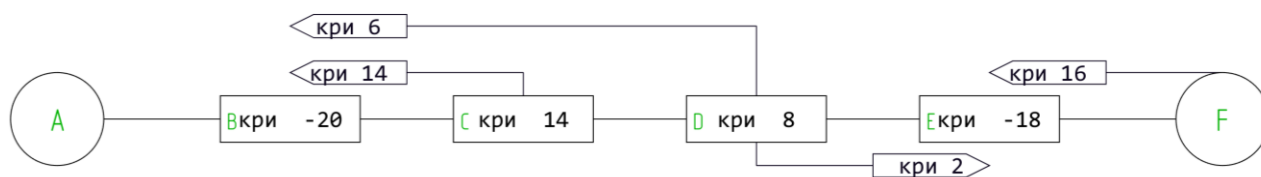


Рисунок 4.11 – Схема розподілу порожніх вагонів для забезпечення місцевої роботи на дільниці А-Ф, що відповідає кінцевому варіанту плану

На основі розподілу порожніх вагонів, поданого на рисунку 4.11, а також даних про добове навантаження і вивантаження місцевих вагонів на дільниці А-Ф (таблиця 4.6) побудовано діаграму балансу вагонів на дільниці (рис. 4.12).

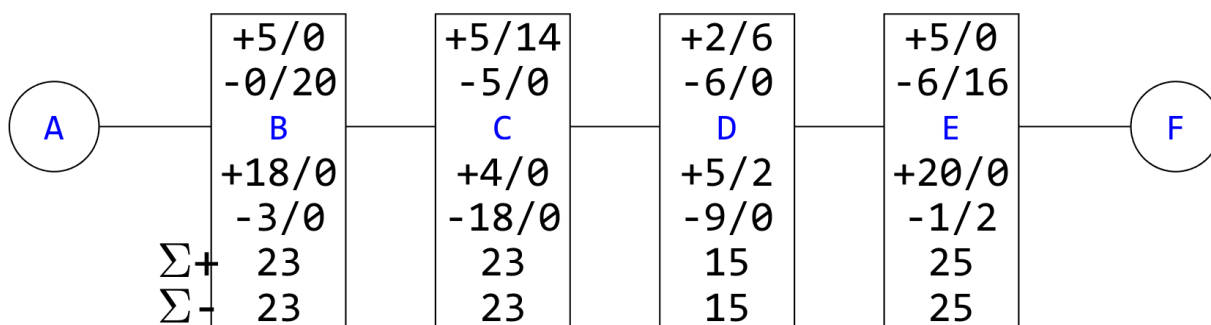


Рисунок 4.12 – Діаграма балансу причеплених і відчеплених місцевих вагонів на дільниці А-В

На основі отриманих діаграм сформовано діаграму місцевих вагонопотоків на дільниці А-В (рис. 4.13).

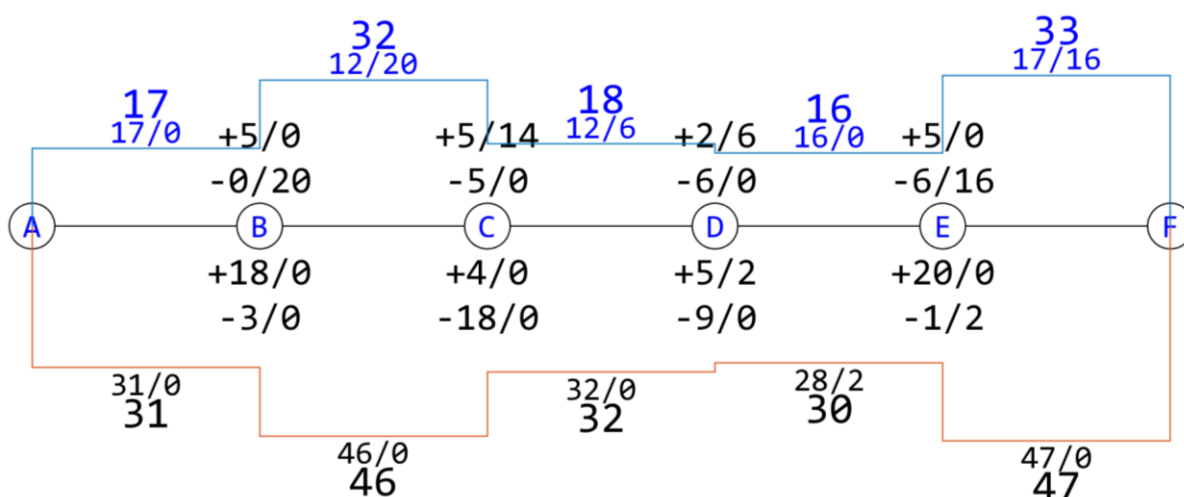


Рисунок 4.13 – Діаграма місцевих вагонопотоків на дільниці А-В

Для спрощення використані дані, що припускають наявність лише однієї пари збірних поїздів, без урахування складніших схем перехрестного руху та інших можливих варіантів. Однак слід ураховувати, що реальні завдання планування місцевої роботи можуть бути ще значно складнішими.

На основі визначеної кількості збірних поїздів і діаграми місцевих вагонопотоків розроблений план-наряд для практичної реалізації руху збірних

поїздів по залізничній дільниці (рис. 4.14). Цей план дає візуальне уявлення про переміщення поїздів і їх зупинки на проміжних станціях для виконання маневрових операцій із причеплення та відчеплення вагонів. Крім того, у плані-наряді зазначено час, витрачений для зупинок на кожній станції.

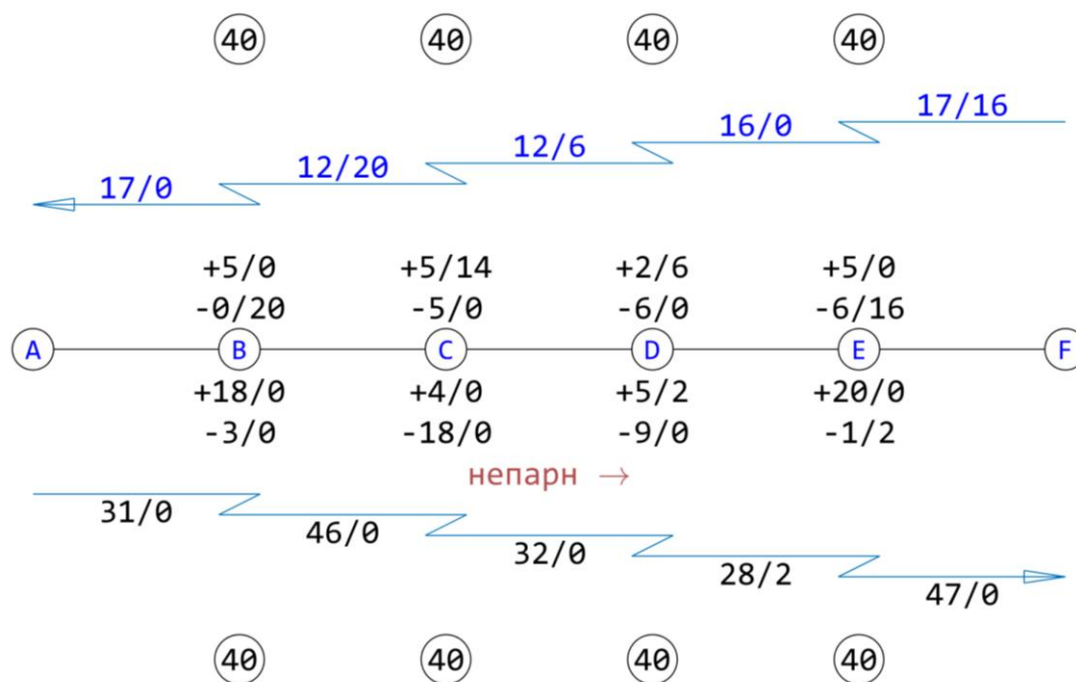


Рисунок 4.14 – План-наряд на роботу збірних поїздів

На станціях, де виконують операції відчеплення і причеплення вагонів, встановлено тривалість зупинок на рівні 40 хв. Для станцій, де проводять лише одні з маневрових операцій, передбачено тривалість зупинок у 25 хв. Такий підхід дає змогу ефективно координувати час для виконання маневрових операцій і забезпечити безперебійний рух збірних поїздів по дільниці.

У результаті оптимізації на основі сформованого плану-наряду та даних про тривалість руху вантажних поїздів по дільниці А-В (рис. 4.14) розроблено робастний план організації роботи збірних поїздів відповідно до схеми «перший парний поїзд» (рис. 4.15).

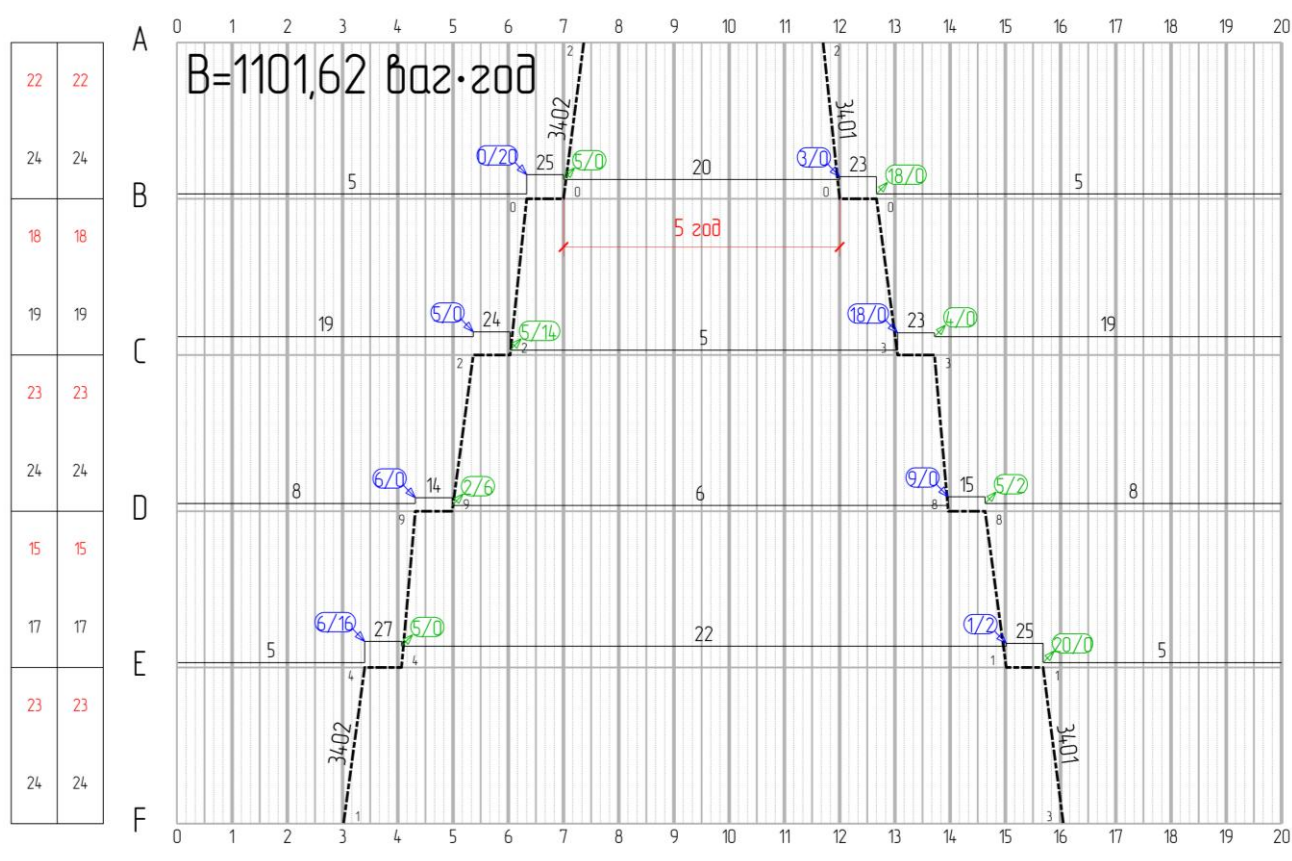


Рисунок 4.15 – План роботи збірних поїздів на ділянці А-В за схемою «перший парний поїзд»

Витрати вагоно-годин для плану, що реалізує схему «перший парний поїзд», становлять 1101,62 ваг. год. Слід зазначити, що витрати для найскладнішого сценарію з даними за схемою «перший непарний поїзд» перевищують витрати для «першого парного поїзда» лише на кілька десятків вагоно-годин. Розроблена оптимізаційна процедура спроектована для врахування екстремальних випадків, зокрема ситуацій, де вартість неоптимального рішення для такої комбінації даних була надзвичайно високою. Це дало змогу виявити варіанти реалізації даних, де в разі оптимальності ухвалених управлінських рішень відбувалася кардинальна економія витрат вагоно-годин. Або це можна трактувати як запобігання значним витратам вагоно-годин.

Один із таких певною мірою типових варіантів реалізації вихідних даних, які подані як інтервальні числа, наведений у таблиці Г.1 (додаток Г). Також на рисунках

Г.2–Г.5 (додаток Г) наведені схема розподілу порожніх вагонів, діаграма місцевих вагонопотоків на дільниці, а також плани роботи збірних поїздів на дільниці за різними схемами, що відповідають даним таблиці Г.1. Як видно з рисунків Г.4 та Г.5, витрати у випадку роботи збірних поїздів за схемою «перший парний поїзд» становлять 1533.72 ваг. год, натомість витрати у випадку роботи збірних поїздів за схемою «перший парний поїзд» становлять лише 304.97 ваг. год. Отже, витрати залежно від ухваленого рішення в цьому відрізняються аж у п'ять разів, а в абсолютних показниках - на 1228.75 ваг. год. І лише на одній залізничній дільниці і лише за одну добу. Отже, економічні витрати в разі неправильно ухвалених рішень у сфері управління місцевою роботою можуть бути дуже високими.

Оптимальним рішенням у разі реалізації такого варіанта вихідних даних є план роботи збірних поїздів за схемою «перший парний поїзд», і саме таке рішення було вибрано в результаті оптимізації розробленої математичної моделі, що додатково підтверджує її адекватність і точність.

У рамках запропонованого підходу стохастично-робастної оптимізації вдалося поєднати переваги як стохастичної, так і робастної оптимізації, створивши більш стійкий та ефективний інструмент для вирішення задач в умовах невизначеності. Окремо стохастична оптимізація орієнтована на пошук рішень, що забезпечують оптимальність за умов відомих імовірнісних характеристик випадкових факторів. Однак цей підхід не гарантує стійкості рішення у випадку реалізації малоїмовірних, але можливих сценаріїв, що може суттєво вплинути на якість управлінських рішень. Робастна оптимізація сфокусована на забезпеченні стійкості рішень до невизначеності, однак це часто призводить до отримання консервативних результатів, які можуть не бути оптимальними за більш сприятливих умов.

Поєднання цих двох підходів у стохастично-робастній моделі дає змогу зберегти баланс між оптимальністю і стійкістю, що є її основною перевагою. Застосування стохастичного підходу для відсіву малоїмовірних рішень зменшує область допустимих рішень, відкидаючи ті варіанти, реалізація яких є малоїмовірною, але водночас не настільки важливі для загальної ефективності. Це

забезпечує не лише стійкість до найгірших сценаріїв (робастність), але й оптимальність у більш реалістичних умовах, характерних для стохастичної природи системи.

Отже, запропонований підхід дає змогу отримати рішення, що є як робастними, так і достатньо гнучкими до різних варіантів розвитку подій. Це знижує загальні ризики, пов'язані з невизначеністю, забезпечуючи більш високу якість управлінських рішень порівняно з окремими методами стохастичної чи робастної оптимізації.

4.8 Висновки до четвертого розділу

Класичні задачі UEP є головним аспектом системи управління ЗТС. Деякі з цих задач були сформульовані більш ніж століття тому, коли економічне, технологічне, інформаційне і правове середовища були зовсім іншими. І хоча експлуатаційна робота завжди була пов'язана з численними факторами, які важко передбачити або врахувати наперед, однак за сучасних умов кількість цих факторів збільшилася в багато разів. Така ситуація обумовлена збільшенням обсягів перевезень, фактором наявності ринкового середовища, підвищенням вимог до рівня якості обслуговування з боку клієнтів тощо. Крім того, останніми роками до цих факторів додалися ще й інші серйозні негативні фактори, такі як глобальні та локальні потрясіння у вигляді політичних та економічних криз, пандемій, збройних конфліктів тощо. Усі ці явища призводять до підняття рівня невизначеності в системі управління експлуатаційною роботою над критичну межу, унаслідок чого ефективність застосування класичних традиційних технологій управління кардинально знижується.

За таких умов формування підходів і впровадження розроблених на їхній основі методів і моделей, які здатні хоча б частково нівелювати негативний вплив факторів невизначеності на управлінські процеси, є вкрай необхідним.

Уже існує багато математичних методів та інструментів, призначених для обробки даних із різними видами невизначеності, такі як м'які обчислення, методи машинного навчання тощо.

Однак існують й інші – більш класичні - підходи, які також можуть бути досить ефективним засобами зниження рівня невизначеності в системі, натомість вони часто залишаються поза увагою. Одним із таких підходів є уточнення моделей. Саме деталізація моделей може стати основою для більш стійких і точних управлінських рішень в умовах, коли невизначеність є невід'ємною складовою експлуатаційних процесів.

Уточнення потребують насамперед найбільш важливі, системоутворюючі моделі. Однією з таких моделей є модель побудови плану формування одnogрупних вантажних поїздів. План формування поїздів є основою стратегічного рівня управління ЗТС. Фактично ПФП – це єдиний технолоічний процес функціонування всіх залізничних станцій на мережі АТ «Укрзалізниця». Крім того, він також одночасно є моделлю організації вантажних вагонопотоків і схемою розподілу сортувальної роботи між технічними станціями. ПФП, зокрема, встановлює рід і станцію призначення кожного вагона, категорії вантажних поїздів, що формують і відправляють технічні станції, станції їх формування і розформування. ПФП є фундаментом для побудови планів і вироблення різних управлінських рішень на всіх інших рівнях управління, на його основі, зокрема, розробляють такі важливі документи, як графік і розклад руху поїздів по всій залізничній мережі.

Запропонована модифікація моделі розрахунку ПФП спрямована на уточнення витрат вагоно-годин у процесі переробки вагонопотоків на технічних станціях за рахунок урахування ефекту завантаженості станцій. Цей ефект полягає в тому, що з досягненням певного рівня завантаженості, зазвичай значно меншого за нормативний показник максимальної переробної спроможності, технічна станція, використовувана в системі як пункт переробки вагонопотоків, продовжує виконувати свою функцію, однак при цьому збільшуються простой вагонів в очікуванні операцій з ними, відповідно до цього підвищуються витрати вагоно-годин.

З цією метою було запропоновано використання залежності, яку можна визначити як функцію з лінійним зростанням після порогу. Оптимальність використання такого виду залежності доведено і теоретично, і на основі реальних статистичних даних. Використання такої функції для апроксимації статистичних даних залежності середнього часу обробки вагона від завантаженості станції дало змогу визначити межі між режимами роботи станції, на яких цього ефекту не спостерігають, і завантаженими режимами, на яких цей ефект стає суттєвим.

Розроблено модифіковану оптимізаційну математичну модель розрахунку ПФП, яка враховує уточнення у вигляді запропонованої залежності. На основі проведеного моделювання на абстрактному полігоні із застосуванням запропонованої уточненої моделі доведено, що вона дає змогу отримати більш адекватний і разом із тим більш економічний варіант плану. Порівняльний аналіз результатів розрахунків за типовою та вдосконаленою моделями показав, що врахування ефекту перевантаженості станцій знизило реальні витрати на 3,5 % загальних витрат накопичення та переформування составів, продемонструвавши в такий спосіб, що запропонований підхід для зниження рівня невизначеності епістемічного типу на основі уточнення моделі дає змогу в результаті знизити й реальні витрати ресурсів у системі.

Новий підхід для вирішення класичних задач з управління експлуатаційною роботою, спрямований на подолання негативного впливу факторів невизначеності також і алеаторного типу, що продемонстровано на прикладі задачі управління місцевою роботою залізничної дільниці. З цією метою задачу планування роботи збірних поїздів на дільниці місцевої роботи формалізовано у вигляді задачі стохастичної робастної оптимізації. Невизначеність під час реалізації процесу виконання місцевої роботи на проміжних станціях дільниці виникає внаслідок неритмічності роботи підприємств, які відправляють і отримують вантажі, а також внаслідок певної стохастичності процесу виконання вантажних операцій. Застосування робастного підходу зумовлено необхідністю отримання надійного плану роботи збірних поїздів, який буде стійким до коливань обсягів місцевої роботи на станціях і залишиться актуальним навіть у разі реалізації найгіршого

варіанта розвитку подій. З цією метою для подання обсягів місцевої роботи запропоновано використання інтервальних чисел. Також для втілення робастного підходу для вирішення цієї задачі цільова функція оптимізаційної моделі, подана як критерій витрат вагоно-годин, реалізована на основі принципу мінімаксу. Одночасно з концепцією робастної оптимізації в моделі реалізовано і принципи стохастичної оптимізації. Це зроблено з метою ще більшого підвищення якості отриманих рішень завдяки звуженню області припустимих рішень шляхом відсіювання малоімовірних комбінацій значень керуючих змінних моделі. Цей підхід реалізовано шляхом введення в систему обмежень моделі обмеження, яке запобігає включенню до області припустимих рішень варіантів, імовірність яких є нижчою за певний рівень. Безпосереднє оцінювання величини ймовірності варіантів і задавання порогового рівня імовірності мають певні труднощі внаслідок великої кількості варіантів, обумовлених комбінаторною природою задачі. Тому для подолання цієї проблеми введена величина відносної значущості, що являє собою співвідношення імовірності поточного варіанта і імовірності найбільш вірогідного варіанта.

Імовірність реалізації обсягів місцевої роботи запропоновано визначати за допомогою статистичних розподілів (за наявності даних) або біноміального розподілу, адекватність застосування якого доведено теоретично.

На основі сформованої моделі розроблено оптимізаційну процедуру, яка використовує математичний апарат генетичних алгоритмів.

За результатами моделювання отримано робастну схему роботи збірних поїздів на дільниці і тим самим доведено ефективність розробленого підходу.

Отже, класична задача управління місцевою роботою на дільниці вперше сформульована у вигляді задачі стохастичної робастної оптимізації. Співставлення отриманого рішення з іншими екстремальними варіантами розвитку подій довело його робастність і ефективність.

Запропоновані підходи для вирішення класичних задач з теорії управління експлуатаційною роботою в умовах дії факторів невизначеності, які належать до різних її класів, продемонстрували свою ефективність і практичну цінність.

РОЗДІЛ 5

ФОРМУВАННЯ ТЕХНОЛОГІЇ РИЗИК-МЕНЕДЖМЕНТУ ДЛЯ ВИРІШЕННЯ ПРОБЛЕМИ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ДОТРИМАННЯ СТРОКУ ДОСТАВЛЕННЯ ВАНТАЖІВ У КОНТЕКСТІ ОПЕРАТИВНОГО УПРАВЛІННЯ ЗАЛІЗНИЧНИМИ ТЕХНІЧНИМИ СТАНЦІЯМИ В УМОВАХ НЕВИЗНАЧЕНОСТІ

5.1 Аналіз проблеми несвоєчасного доставлення вантажів залізничним транспортом в Україні

Реформаційні процеси, що відбуваються на залізничному транспорті, значно ускладнюють управління наявними ризиками та активізують створення нових ризиків, викликаних зміною форми власності, організаційної структури управління та особливостями перебудови відносин залізничної компанії з державними та місцевими органами влади, суспільством, постачальниками, споживачами та іншими учасниками бізнес-відносин [82] (зокрема клієнтами).

Саме негативне економічне підґрунтя, що утворилося в галузі вантажних залізничних перевезень унаслідок неоднозначних реформ, а також впливу внутрішніх і зовнішніх негативних факторів, таких як несприятлива кон'юнктура на сировинних ринках, пандемія, економічна криза, збройна агресія, значно загострили цілу низку проблем, виявивши тим самим нерелевантність або й взагалі відсутність технологій ризик-менеджменту за багатьма напрямками управління експлуатаційною роботою залізничного транспорту.

Однією з таких серйозних проблем, що останніми роками постала особливо гостро перед ЗТС України, є проблема несвоєчасного доставлення вантажів, що призводить до значних фінансових втрат [83]. Ця проблема негативно впливає як на самих залізничних перевізників, так і клієнтів.

У 2021–2022 роках було зафіксовано численні затримки в перевезенні зернових вантажів, що призвело до значних економічних втрат для аграрного

сектору. Це зумовлено і перевантаженням станцій, і недостатньою кількістю рухомого складу.

АТ «Укрзалізниця» змушена виплачувати значні штрафи за невиконання строків доставлення вантажів. Це суттєво впливає на фінансовий стан компанії. Наприклад, за 2022 рік загальна сума штрафів, виплачених АТ «Укрзалізниця» за порушення строків доставлення, склала понад 100 млн грн.

У 2022 році АТ «Укрзалізниця» зіткнулася з серйозними затримками в перевезенні вугілля та руди, що вплинуло на енергетичний і металургійний сектори. Штрафи за несвоєчасне доставлення цих вантажів склали десятки мільйонів гривень.

Несвоєчасне доставлення вантажів призводить до економічних втрат для бізнесів, які залежать від надійного та своєчасного постачання. Це знижує довіру до залізничного транспорту і стимулює пошук альтернативних видів перевезень.

Регулярні затримки негативно впливають на репутацію АТ «Укрзалізниця» як надійного партнера з перевезення вантажів. Це може призводити до втрати клієнтів і зменшення обсягів перевезень [84].

Несвоєчасне доставлення вантажів залізничним транспортом в Україні є значною проблемою, яка потребує комплексного вирішення. Впровадження сучасних технологій оперативного управління ТС може стати ефективним шляхом для скорочення простою вагонів, зниження штрафів і покращення якості обслуговування клієнтів. Інвестиції в модернізацію залізничної інфраструктури та автоматизацію процесів є основними кроками для підвищення ефективності та конкурентоспроможності української залізниці.

Отже, для залізничної галузі однією з найважливіших невирішених проблем є проблема порушення строків доставлення вантажів із відповідними фінансовими наслідками у вигляді багатомільйонних штрафів. Це суттєво скорочує прибутки компаній, які й без того працюють в умовах зношеної інфраструктури та обмежених інвестицій. Несвоєчасні поставки вантажів порушують графіки роботи підприємств-клієнтів, завдають їм великих збитків і призводять до втрати довіри до залізничних перевізників.

Причинами несвоєчасного доставлення вантажів є:

- застаріла залізнична інфраструктура;
- обмежена пропускна спроможність окремих ділянок мережі;
- недостатня кількість локомотивів і вантажних вагонів;
- низька якість диспетчерського управління;
- неефективне планування та організація перевезень.

СС виконують основну роботу з формування і розформування поїздів, від яких значною мірою залежать потрібний парк вагонів для виконання заданого обсягу перевезень і швидкість доставлення вантажів [85]. Скорочення часу знаходження вагонів на СС значно впливає на прискорення доставлення вантажів і задоволення потреб клієнтів у перевезеннях [85].

Є також причини, які все ж таки не можна назвати управлінськими, бо вони скоріше організаційні. Наприклад, система МЕСПЛАН [86], що автоматизує облік заявок на перевезення вантажів, не враховує реальні перевізні можливості залізничного транспорту. Це призводить до перенасичення маршрутів і затримок у доставленні вантажів. Хоча, звісно, ця проблема частково могла б бути вирішена за рахунок управлінських заходів, таких як удосконалення моделей управління пропускною спроможністю [87].

Ці фактори в сукупності призводять до систематичних затримок, зриву графіків доставлення, простоїв вагонів і суттєвих фінансових втрат для всіх учасників процесу. Для вирішення проблеми необхідні значні інвестиції в оновлення парку локомотивів і вагонів, модернізацію колійної інфраструктури, впровадження сучасних систем диспетчеризації та управління перевезеннями. Також важливо вдосконалити нормативно-правову базу та посилити відповідальність за порушення строків доставлення. Лише комплексний підхід дасть змогу підвищити надійність і ефективність залізничних вантажних перевезень в Україні.

Одним із основних напрямів підвищення ефективності вантажних залізничних перевезень в Україні є вдосконалення технології управління роботою ТС. Статистичні дані свідчать, що в середньому вантажний вагон лише 11–13 год знаходиться безпосередньо в русі протягом одного циклу перевезення [88]. Решта

часу, тобто більше 90 % тривалості циклу, вагон простоє на ТС. При цьому, за оцінками експертів, середній оборот вагона в Україні становить близько 10 діб, протягом яких вагон проходить близько восьми переробок на ТС.

Таке значне переважання часу простою над часом руху пояснено специфікою роботи ТС, де відбуваються основні процеси формування, переформування та розформування поїздів. Зношеність інфраструктури, відсутність достатньої автоматизації та ефективних систем диспетчеризації призводять до значних затримок для виконання цих операцій, а це спричиняє неприпустимо тривалі простої вагонів, що негативно позначається на строках доставлення вантажів.

Автоматизація управління лише окремими операціями і процесами на ТС, навіть із застосуванням не найсучасніших на момент впровадження технологій, все одно здатна суттєво підвищити ефективність процесів обробки вагонів на станціях.

Для прикладу, впровадження автоматизованих систем управління сортувальними гірками ще у 1970-1980-ті роки дозволило скоротити тривалість розформування составів на 20–30 % [89]. Однак тепер переважна більшість із цих систем гіркової автоматизації, таких як система гіркової автоматизованої централізації (ГАЦ), система автоматизованого задавання швидкості розпуску (АЗШР), система автоматизованого регулювання швидкості розпуску АРШ, не використовувані з різних причин, у тому числі їхнього несправного стану. Застосування передових технологій моніторингу технічного стану інфраструктури та рухомого складу також здатне зменшити час, необхідний на виконання оглядів і поточних ремонтів. Отже, комплексна модернізація технології управління ТС здатна стати одним із найбільш ефективних джерел підвищення швидкості та надійності вантажних залізничних перевезень.

Вирішенням цієї проблеми має стати впровадження сучасних інформаційних технологій і засобів автоматизації управління ТС. Застосування інтелектуальних систем диспетчеризації, технологій безперервного моніторингу та прогнозування дасть змогу значно підвищити ефективність і пропускну спроможність станційних процесів [90], що забезпечить скорочення тривалості простоїв вагонів і, як наслідок, прискорить доставлення вантажів.

Отже, основним аспектом у вирішенні цієї проблеми має бути саме перехід на сучасні логістичні технології оперативного планування роботи ТС, здатні оптимізувати не окремі процеси та операції, а оптимізувати роботу всіх підсистем станції одночасно. Такий підхід передбачає створення і використання системного ефекту і оптимізацію станційних операцій на новому рівні, що забезпечить найвищий рівень ефективності функціонування всієї системи.

5.2 Аналіз проблеми недотримання строку доставлення в контексті технологічного процесу роботи технічних станцій

Залізничний транспорт є головним елементом логістичного ланцюга вантажних перевезень, і ефективне управління обробкою вагонів на станціях відіграє критичну роль у забезпеченні надійності процесу перевезень. Якщо раніше основними проблемами на мережі АТ «Укрзалізниця» були нестача рухомого складу, зокрема вантажних вагонів і локомотивів, то тепер актуальною стає проблема недотримання строків доставлення вантажів [91]. Одним із факторів цієї проблеми є війна, яка, безумовно, впливає на перевізний процес. Проте слід зазначити, що невиконання строків доставлення не є прямим наслідком нестачі рухомого складу, оскільки ця проблема була частково вирішена в останні роки. Основною причиною недотримання строків доставлення вантажів, окрім впливу війни, є неефективне оперативне управління перевізним процесом на залізниці [92].

Завдання визначення пріоритетності обробки вагонів у залізничних перевезеннях є актуальним через ряд факторів і викликів, які виникають у сучасних логістичних процесах. Однією з основних причин є необхідність оптимізації логістичних потоків, оскільки зростання обсягів вантажоперевезень на залізницях потребує ефективнішого розподілу ресурсів для зниження затримок. Крім того, залізничний транспорт змагається з іншими видами транспорту, і швидке і точне

сортування вагонів дає змогу забезпечити високу якість обслуговування, що критично важливо для залучення клієнтів і підтримки конкурентоспроможності.

Ще одним важливим аспектом є мінімізація штрафів за порушення строків доставлення вантажів, які можуть суттєво впливати на витрати залізничних компаній. Ефективне визначення пріоритетності обробки вагонів допомагає уникнути збільшення штрафів, тим самим підвищуючи фінансову стійкість логістичних операторів. З розвитком сучасних технологій, таких як Інтернет речей (англ. IoT) і системи штучного інтелекту (AI), стало можливим ефективно використання даних для ухвалення рішень у реальному часі, що значно сприяє оптимізації процесу обробки вагонів.

Вирішення складної багатофакторної проблеми управління процесом доставлення вантажу, що за своєю суттю складає проблему координації функціонування транспортного комплексу в умовах нечіткості та неповної інформаційної визначеності, доцільно здійснити, використовуючи методологію концептуально-логічного відображення та проєктного моделювання транспортних систем [93].

Отже, постановка цього завдання базована на потребі покращення логістичних процесів, забезпечення високої якості обслуговування та вирішенні фінансових викликів, що виникають у залізничних перевезеннях.

Актуальною є проблема пріоритезації обробки вагонів на залізничній станції та розроблення автоматизованої системи, яка враховуватиме всі важливі фактори для ефективного ухвалення рішень. Аналіз наукових публікацій останніх років показує, що питання пріоритезації обробки вагонів на залізничних ТС досліджено поверхнево. Сучасні публікації в галузі залізничного транспорту і логістики свідчать, що цю проблему рідко розглядають як окреме та чітко визначене завдання. Більшість досліджень зосереджені на загальних питаннях оптимізації залізничних перевезень та управління логістичними потоками, не приділяючи достатньої уваги специфіці обробки вагонів на ТС.

Недоліки сучасних досліджень полягають у відсутності чітко визначених методик надання пріоритетів вагонам з урахуванням їхньої конкретної ситуації та

потреб. Систематичний підхід до пріоритезації вагонів, який враховує різні фактори, такі як затримки, залишковий час і штрафи, залишається недостатньо вивченим. Розроблення такого підходу є необхідним для підвищення ефективності управління залізничними ТС і зменшення витрат, пов'язаних із затримками та порушенням строків доставлення вантажів.

Крім того, існують і інші фактори, необхідність урахування для визначення пріоритету обробки вагонів яких може мати велике значення. Ці фактори можуть бути пов'язані, наприклад, з небезпекою, пов'язаною з перебуванням на СС, особливо тих, що розташовані в безпосередній близькості від населених пунктів, вагонів із небезпечними вантажами [94, 95].

Невизначеність у питанні пріоритезації вагонів значно ускладнює діяльність залізничних компаній і логістичних операторів, які стикаються з непередбачуваними затримками та неефективним управлінням транспортними потоками. Відсутність чіткої методології пріоритезації може призводити до значних фінансових втрат через штрафні санкції за порушення строків доставлення. Це підкреслює необхідність подальших досліджень і розроблення нових методів пріоритезації обробки вагонів, спрямованих на підвищення ефективності та точності управління залізничними перевезеннями. Вирішення цієї проблеми сприятиме покращенню логістичних процесів, зниженню витрат і підвищенню конкурентоспроможності залізничного транспорту.

5.3 Формування нейромережевої моделі визначення пріоритету обробки вагонів на технічних станціях в умовах невизначеності

У сучасних умовах управління ТС оперативний персонал стикається з численними викликами, що впливають на ефективність обробки та формування вантажних поїздів. Зокрема, несподівані коливання вантажних потоків [96] і технічні проблеми можуть суттєво ускладнювати ці процеси. Зміни в динаміці та

обсязі перевезень спричиняють нестабільність у роботі станцій. Технічні несправності й аварії призводять до непередбачуваних затримок і обмежень у русі поїздів, ускладнюючи обробку вагонів. Крім того, неправильні управлінські рішення в плануванні та координації руху поїздів на мережі можуть призвести до неефективності та затримок.

Кліматичні умови і стан інфраструктури також можуть створювати непередбачувані ситуації. Нестабільність вагонопотоків є важливим фактором, що підвищує рівень невизначеності та впливає на можливість вагонів дотримуватися графіка перевізного процесу. Наприклад, якщо не надати підвищеного пріоритету вагонам певних напрямків, а потім різко знизити трафік вагонів цього або суміжних напрямків через станцію, швидкість формування поїздів цього напрямку може значно зменшитися. Це призведе до подальшого відставання від графіка і, як наслідок, порушення строків доставлення й нарахування штрафів.

Така ситуація потребує від залізниць вирішення проблеми удосконалення сучасних технологій перевізного процесу, пов'язаних із формуванням, організацією та відправленням вантажних поїздів на основі концепції, яка забезпечить гнучкість експлуатації залізниць, зокрема технології формування одnogрупних поїздів [97].

У такому контексті виникає необхідність вдосконалення систем управління та впровадження ефективних рішень для прискорення обробки і формування вантажних поїздів. Застосування НМ дає змогу автоматизувати і оптимізувати процеси управління на ТС, забезпечуючи швидкість і ефективність обробки вагонів в умовах невизначеності.

Першим і найважливішим фактором у визначенні пріоритету обробки та відправлення вагонів у системі залізничних перевезень є поточна затримка. Для обчислення цього показника використовують різницю між фактичним часом прибуття вантажу до пункту призначення та запланованим часом, розрахованим на початку маршруту. Водночас враховують поточне місцезнаходження вагона, відстань до пункту призначення та поточну швидкість для конкретної категорії поїздів [98-100].

Застосування НМ у цих процесах дає змогу враховувати численні параметри та швидко ухвалювати рішення про пріоритезацію вагонів, що значно підвищує ефективність обробки вантажних потоків. В умовах високої нестабільності та численних змін така автоматизація допомагає уникати затримок, зменшувати витрати і покращувати загальну продуктивність залізничної системи.

Другий аспект, який необхідно враховувати, – це залишковий час, що визначають як різницю між запланованим строком доставлення та фактичним часом. Слід зазначити, що наявність значного залишкового часу має стратегічне значення, оскільки це дає змогу вживати заходів для вирішення потенційних проблем і запобігання надмірному збільшенню пріоритету для конкретного вагона.

Третім фактором слід вважати величину штрафу, який може бути стягнутий із залізничного підприємства в разі недотримання строку доставлення вантажу. Наприклад, якщо два вагони мають однакові всі інші фактори, слід обробляти першим той вагон, за перевезення якого була сплачена більша провізна плата. Це може свідчити про дорожчий вантаж або більшу відстань перевезення. Хоча договори чи інші нормативні документи, за якими нараховують суму штрафу, можуть містити й інші умови, основою зазвичай є саме провізна плата.

Отже, упровадження цих факторів у систему пріоритезації обробки вагонів дасть змогу значно підвищити ефективність і надійність залізничних перевезень, знижуючи ризики затримок і фінансових втрат.

Вибір НМ як математичного апарату для побудови моделі оцінювання пріоритету обробки вагонів обґрунтований їхньою здатністю аналізувати складні та нелінійні зв'язки між численними факторами, що впливають на процеси на залізничних станціях.

За допомогою математичної бази НМ можна автоматично визначати оптимальні вагові коефіцієнти для різних факторів, які визначають порядок обробки вагонів, враховуючи їхню важливість і взаємодію. Це особливо важливо для роботи з великими обсягами даних і численними вхідними параметрами.

НМ прийнятні для завдань прогнозування та класифікації, оскільки вони здатні адаптуватися до складних, неструктурованих даних та ефективно обробляти

зв'язки між різними змінними [101]. Їхня робота базована на принципі взаємозв'язаних шарів нейронів, що автоматично навчаються робити передбачення на основі вхідної інформації.

З використанням НМ для моделювання пріоритету обробки вагонів можна враховувати різні параметри, такі як час затримки, залишковий час, величина штрафу та інші, і навчити модель автоматично оцінювати їхню вагомість для визначення порядку обробки. Цей підхід дає змогу створювати адаптивні моделі, які ефективно працюють зі складними залежностями в даних, що забезпечує точніше та надійніше оцінювання пріоритетів обробки вагонів на залізничних ТС.

У рамках НМ для визначення пріоритетності обробки вагонів у залізничних перевезеннях процес визначення пріоритету розглядають як оптимізацію вагових коефіцієнтів, що визначають важливість різних факторів для вибору порядку обробки. Модель використовує архітектуру повнозв'язаної НМ, що включає такі етапи обробки:

1. На початковому етапі вхідний шар НМ набуває різних параметрів, таких як поточні затримки, залишковий час і величина штрафів. Ці фактори використовують для визначення пріоритету обробки вагонів.

2. Далі інформацію передають через приховані шари мережі, де нейрони обчислюють взаємодію між різними факторами і їхніми вагами. Вагові коефіцієнти корегують у процесі навчання на основі історичних даних.

3. На виході мережі розташований вихідний шар, що складається з нейронів, які формують оцінки пріоритету для кожного вагона. Функція активації на цьому шарі визначає, як саме враховані різні фактори для розрахунку пріоритету.

4. Функція втрат оцінює різницю між розрахованим і фактичним пріоритетом на тренувальних даних. Мережа прагне мінімізувати цю різницю під час навчання.

5. Для корекції ваг використано оптимізатор, який працює на основі втрат і градієнтів. Зворотне поширення помилок допомагає мережі адаптувати ваги для покращення точності прогнозування пріоритету. Отже, нейромережева модель автоматично враховує та оптимізує різні фактори, що впливають на процес обробки та відправлення вагонів.

На рисунку 5.1 подана модель на базі архітектури повнозв'язної НМ прямого розповсюдження сигналу, розроблена для вирішення завдання визначення пріоритетів обробки вагонів. Фактично таку архітектуру можна назвати багатошаровим персептроном [102]. Модель включає три вхідні параметри і два вихідні параметри, що забезпечують можливість комплексного аналізу та оцінювання пріоритетів.

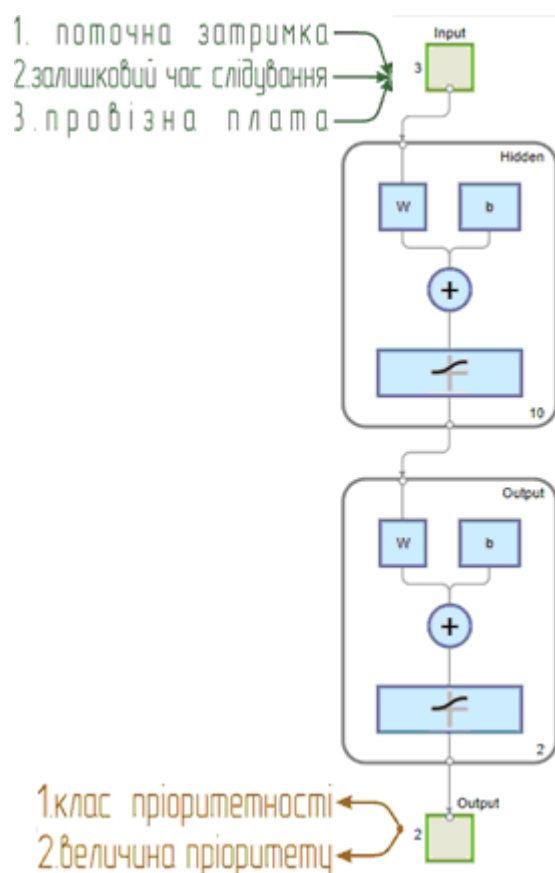


Рисунок 5.1 – Архітектура повнозв'язної НМ прямого розповсюдження сигналу

Обчислення у НМ такої архітектури мають певні особливості. Розрахунок підсумовування ваг для нейрона у прихованому шарі можна виразити формулою

$$z = \sum_{i=1}^n (w_i \cdot x_i) + b, \quad (5.1)$$

де n – кількість вхідних параметрів;

W_i – ваговий коефіцієнт;

X_i – вхідний параметр;

b – зсув.

У контексті НМ «зсув» (англ. bias) [103] є додатковим параметром, який додають до зваженої суми вхідних сигналів перед застосуванням функції активації. За допомогою нього можна зсунути результат зваженої суми, що може бути критично важливим для коректної роботи нейрона. Зсув допомагає нейрону краще адаптуватися до даних, даючи йому змогу генерувати більш точні результати для виконання різних задач, таких як класифікація чи регресія.

Отже, якщо Z – зважена сума вхідних сигналів, а b – зсув, то входи у функцію активації виглядають так:

$$f(z + b). \quad (5.2)$$

Зсув дає змогу моделі враховувати зміщення відносно нульового входу, що сприяє адаптації до різних умов і оптимізації параметрів нейрона. Це забезпечує додаткову гнучкість у навчанні моделі.

Як функцію активації для нейрона у прихованому шарі використовують логсигмоїдальну функцію (logsig) [104], формула якої

$$f(z) = \frac{1}{1 + e^{-a \cdot z}}, \quad (5.3)$$

де a – параметр, що відображує нахил (англ. slope) функції активації. Часто цей параметр вибирають як певну константу (наприклад $a = 1$), але в нашому випадку цей параметр також підлаштовується з оптимізацією під час тренування НМ.

У вихідному шарі, де h – вектор активацій прихованого шару, вихідний сигнал O розраховують аналогічно:

$$o = \sum_{j=1}^m (w_j \cdot h_j) + b, \quad (5.4)$$

де m – кількість нейронів у прихованому шарі, w_j – ваговий коефіцієнт, h_j – активаційний вихід нейрона у прихованому шарі.

Ці формули ілюструють математичний аспект роботи окремого нейрона та мережі в цілому, ураховуючи вагові коефіцієнти, функції активації та зсуви.

5.4 Навчання моделі, отримання результатів і їх аналіз

Згідно з обраною архітектурою НМ розроблено програмне забезпечення в середовищі MATLAB [105]. У процесі моделювання та оптимізації структури мережі було встановлено, що ефективність моделі досягає високих результатів за умови, що прихований шар містить приблизно 80 нейронів. На рисунку 5.2 зображено діалогове вікно, яке демонструє процес навчання мережі за методом зворотного розповсюдження похибки.



Рисунок 5.2 – Діалогове вікно процесу навчання мережі за методом зворотного розповсюдження похибки

У процесі тренування отримано графіки, що ілюструють динаміку навчання НМ. На першому графіку, який показує зміну похибок навчання (рисунок 5.3), дані розподілені на три основні набори: навчальний, тестовий (перевірочний) і валідаційний.

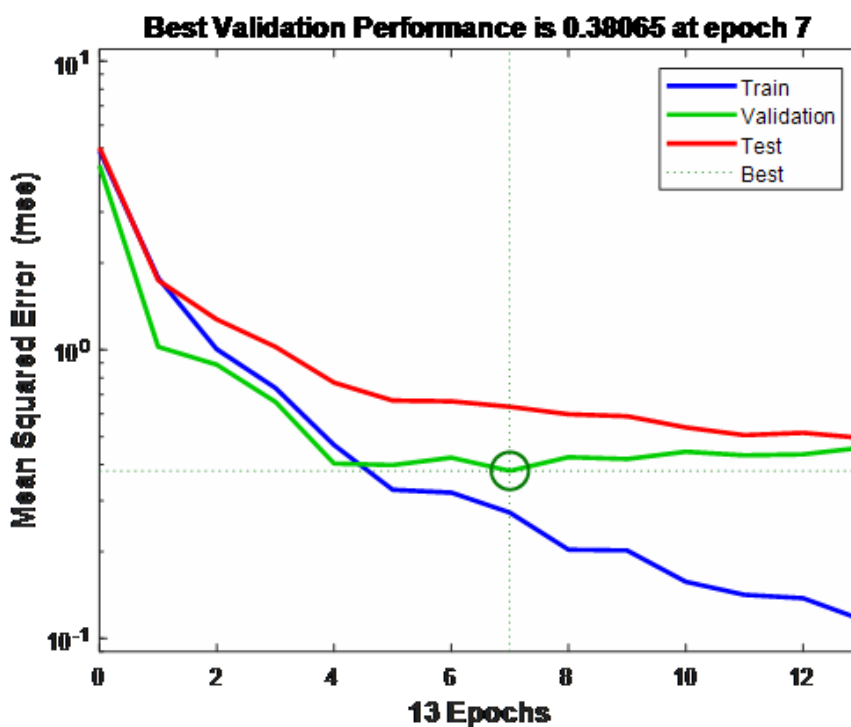


Рисунок 5.3 – Динаміка середньоквадратичних похибок у процесі навчання розробленої мережі із застосуванням навчального, валідаційного і тестового наборів даних

Навчальний набір даних використано для безпосереднього навчання моделі. Під час цього етапу модель адаптується до тренувальних даних шляхом обчислення градієнтів функції втрат і оновлення параметрів для її мінімізації [106].

Тестова вибірка не залучена під час навчання і служить для оцінювання ефективності моделі на нових, раніше невідомих, даних після завершення тренування. Це дає змогу перевірити, наскільки добре модель узагальнює свої навички на даних, не використовуваних для навчання.

Валідаційна вибірка застосована для тонкого налаштування гіперпараметрів моделі та уникнення перенавчання [107]. Модель перевіряють на цій вибірці протягом навчального процесу, а результати використовують для корегування параметрів, таких як швидкість навчання. Поділ даних на навчальний, тестовий і валідаційний набори є стандартною практикою для забезпечення ефективного оцінювання моделі та запобігання перенавчанню [108].

Наступний графік (рисунок 5.4) демонструє динаміку точності або помилки на перевірконому наборі даних. Цей графік дає змогу оцінити, як змінюється ефективність мережі на нових даних протягом процесу тренування. Аналіз результатів перевірконого набору є важливим для визначення здатності мережі узагальнювати набуті знання та забезпечувати точні прогнози на даних, не використовуваних безпосередньо під час навчання.

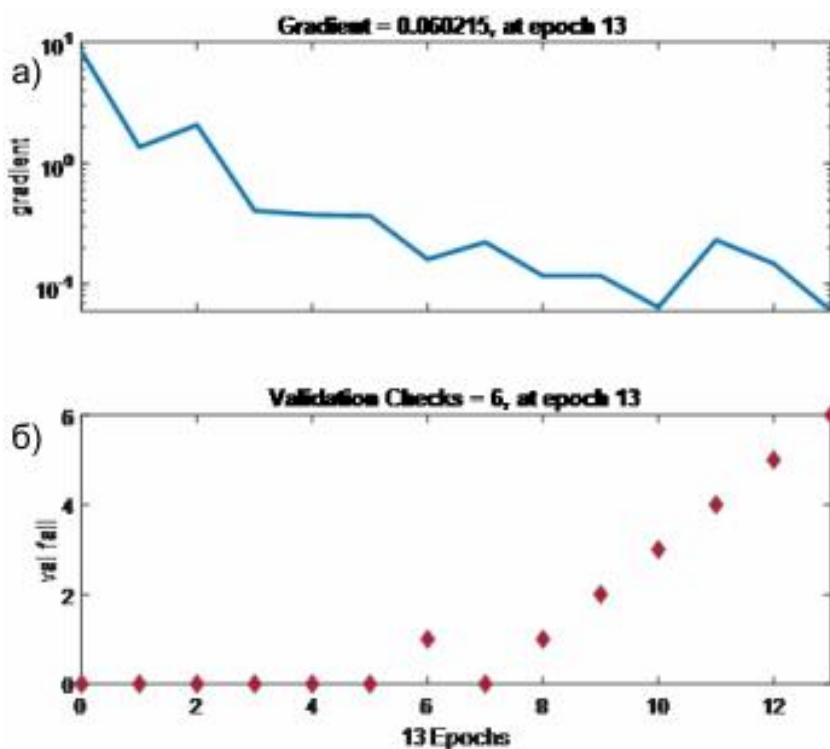


Рисунок 5.4 – Динаміка: а) градієнту і б) помилок валідації в процесі навчання розробленої НМ

Графік гістограми помилок у процесі навчання НМ (рисунок 5.5) ілюструє розподіл помилок між прогнозованими і фактичними значеннями [109]. Аналіз цієї гістограми є важливим для оцінювання якості моделі. Спостереження за нормальним розподілом помилок може свідчити про ефективність навчання. Відхилення від нормального розподілу може вказувати на проблеми, такі як перенавчання або недонавчання, що негативно впливають на здатність моделі узагальнювати результати на нових даних. Оцінювання розподілу помилок і

виявлення можливих проблем допомагають в оптимізації тренування моделі для досягнення кращих результатів.

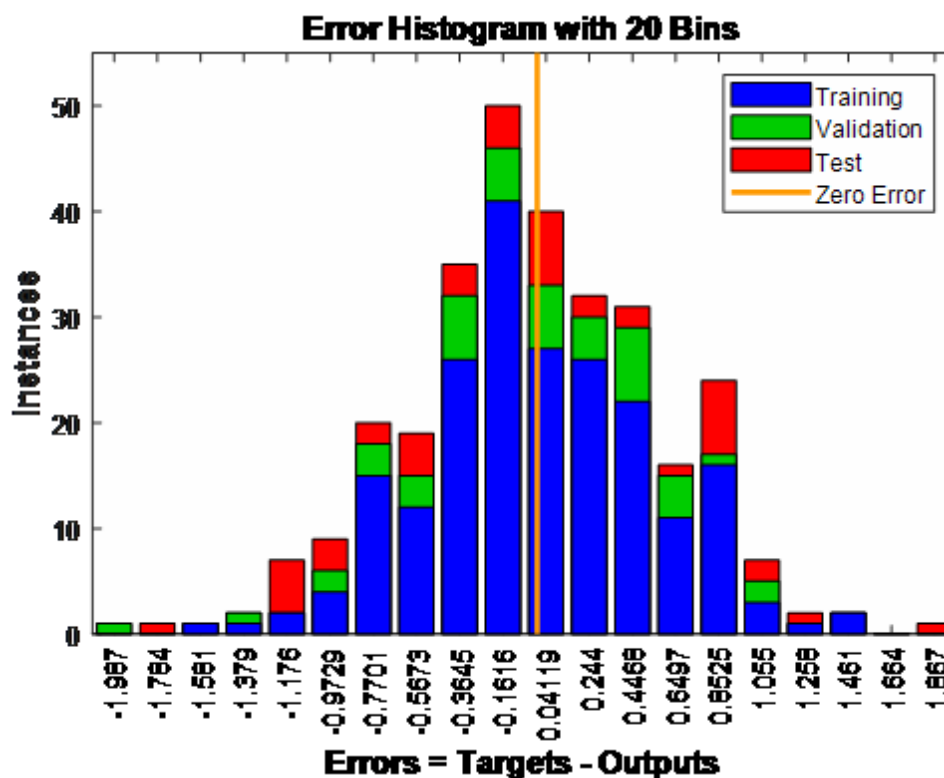


Рисунок 5.5 – Гістограма розподілу кількості екземплярів оцінювання вихідних сигналів мережі згідно з величиною похибки

На наступному тривимірному графіку (рисунок 5.6) подано візуалізацію результатів класифікації за рівнями пріоритету для екземплярів даних, що містять інформацію про вантажні вагони на станції. Графік ілюструє, як дані класифіковано відповідно до визначених рівнів пріоритету для наочного оцінювання ефективності моделі в розподілі вагонів за важливістю обробки.

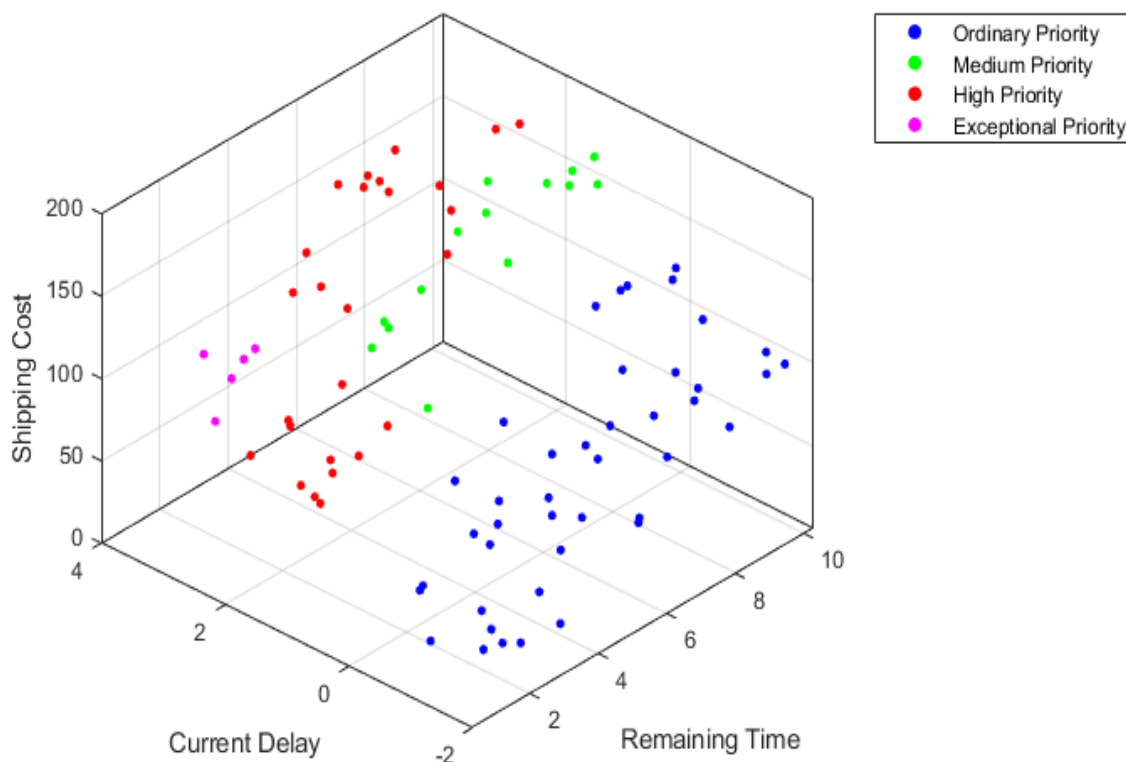


Рисунок 5.6 – Візуалізація класифікації вагонів за допомогою НМ за чотирима класами пріоритетності

Розроблено нейронну модель для визначення пріоритетності обробки вагонів на залізничних ТС, що виробляє два основні параметри, які сприяють ефективному управлінню та оптимізації процесів сортування вагонів. Перший параметр, «клас пріоритетності», визначає категорію пріоритету для кожного вагона, класифікуючи вагони на чотири категорії: «звичайного пріоритету», «середнього пріоритету», «високого пріоритету» і «виняткового пріоритету». Ця класифікація чітко ідентифікує важливість вагона для ТС. Другий параметр, «величина абсолютного пріоритету», являє собою конкретне числове значення пріоритету для кожного вагона, урахувуючи всі фактори, визначені моделлю, і вказує на загальну важливість вагона серед усіх вагонів, які підлягають обробці на станції. Ці параметри забезпечують точне та ефективне управління пріоритетами вагонів, оптимізуючи процеси їх обробки та підвищуючи ефективність роботи залізничних ТС.

Використання двох параметрів, «клас пріоритетності» і «величина абсолютного пріоритету», робить модель ефективнішою і гнучкішою в управлінні

пріоритетами вагонів. Класифікація вагонів на кілька категорій спрощує завдання для операторів, надаючи їм можливість швидше і зручніше управляти потоками вагонів за їхньою важливістю. Величина абсолютного пріоритету забезпечує точну кількісну оцінку, що полегшує прогнозування та планування роботи на ТС.

Класифікація вагонів на кілька категорій також підтверджує принцип роботи НМ, які спеціалізуються на розподілі об'єктів за класами відповідно до їхніх характеристик. Це дає змогу створити більш детальну і точну систему оцінювання і управління пріоритетами, яка враховує різноманітність факторів, що впливають на обробку вагонів.

По-друге, класифікація сприяє зручності та наглядності. За допомогою неї оператори ТС швидко розподіляють вагони за категоріями, що спрощує ухвалення оперативних рішень. Маневровим диспетчерам легше взаємодіяти з системою, визначаючи пріоритети на основі важливості та параметрів, заданих мережею.

Отже, використання двох параметрів – класу пріоритетності та абсолютного пріоритету – підвищує функціональність моделі та робить її більш ефективною для сучасних ТС. Модель відіграє важливу роль у контексті подальшої автоматизації управління залізничними ТС, забезпечуючи можливість розроблення високоякісних СППР для оперативного управління персоналом.

Модель НМ забезпечує автоматичний аналіз і класифікацію вагонів за пріоритетами, що значно підвищує ефективність і швидкість процесу управління. Це дає змогу оперативному керівному персоналу ТС легко аналізувати, інтерпретувати і використовувати дані, які надає система АСК ВП УЗ Є в режимі реального часу [110], для ухвалення швидких і обґрунтованих управлінських рішень.

Модель також сприяє зменшенню невизначеності для ухвалення рішень про порядок обробки вагонів і складів на станції. Основна складність полягає в тому, що точна інформація про те, які вагони з терміновим доставленням можуть «наздогнати» графік і уникнути штрафів зі зміною порядку обробки, не завжди доступна. Проте нейромережева модель забезпечує точне прогнозування таких подій, що допомагає ефективно управляти процесами на ТС.

Застосування моделі НМ робить процес управління станцією менш випадковим і забезпечує працівникам більше інформації для ухвалення обґрунтованих рішень. Завдяки максимально точним прогнозам модель дає надійну основу для управлінських рішень, що сприяє ефективній роботі станції та допомагає уникнути можливих штрафів за порушення графіка доставлення вантажів.

Отже, сформована модель є важливим кроком у розвитку технологій для залізничної галузі. Вона допомагає покращити оперативні процеси та зменшити залежність від ручного втручання. Впровадження такої моделі в системи управління станціями відкриває перспективи для подальших досліджень і розвитку інтегрованих автоматизованих рішень у галузі залізничного транспорту.

5.5 Вимоги до прозорості та варіативності рішень СППР

Аналіз сучасних наукових досліджень у галузі залізничного транспорту і логістики вказує на те, що проблема пріоритезації обробки вагонів на ТС залишається недостатньо вивченою. Більшість публікацій рідко розглядають цю проблему як самостійне та чітко визначене завдання, зосереджуючи увагу переважно на загальних питаннях оптимізації залізничних перевезень і управління логістичними потоками. Недостатньо уваги приділяють специфіці обробки вагонів на ТС із застосуванням ризикових моделей, що є важливою складовою для покращення управлінських рішень і підвищення ефективності процесів.

Вищезазначена модель пріоритезації обробки вагонів на ТС використовує НМ для надання числової оцінки пріоритету кожного вагона. Ця модель призначена для динамічного застосування, що передбачає зміну пріоритету кожного вагона багато разів у процесі оптимізації цільової функції моделі управління. Зміна пріоритетів залежить від варіанта плану, що впливає на порядок обробки вагонів і відповідні параметри, такі як залишковий час доїзду.

Модель має кілька переваг, зокрема простоту і ефективність у реальному часі, оскільки не потрібно значних обчислювальних ресурсів. Суттєвий недолік полягає в тому, що вона функціонує як «чорний ящик». Це означає, що неможливо детально проаналізувати проміжні етапи обчислень або вплинути на них, що ускладнює глибший аналіз і корекцію моделі.

Зазначений недолік є концептуально важливим, оскільки кінцеве призначення моделей, таких як НМ, у контексті управління експлуатаційною роботою полягає в побудові СППР. Такі системи мають не лише надавати детальну інформацію для аналізу, але й пропонувати кілька варіантів рішень. Якщо ж модель є «чорним ящиком», що не дає змогу аналізувати проміжні етапи обчислень або впливати на них, забезпечити таку функціональність стає надзвичайно складно.

НМ, побудовані на основі історичних даних, можуть формувати внутрішні залежності, подібні до ризикових моделей. Проте ці залежності недоступні для користувачів СППР у зрозумілій формі, оскільки вони інтегровані у внутрішню структуру моделі і не підлягають прямому аналізу. Це обмежує можливості моделі в контексті надання прозорих і доступних даних для ухвалення рішень [111].

Відповідно концепція СППР потребує розроблення моделей іншого класу для отримання інформації про проміжні етапи ухвалення рішень [112]. Для завдання управління обробкою вагонів важливим є можливість окремого аналізу ризикових складових, що дає змогу відокремлювати їх від інших експлуатаційних витрат. Це забезпечить більш детальне розуміння процесу та розроблення ефективних стратегій для зниження ризиків і підвищення загальної ефективності управлінських рішень на ТС.

5.6 Формування підходів для підвищення точності моделей оперативного планування роботи технічних станцій в умовах невизначеності шляхом одночасного врахування інформації з різних джерел на основі ТДШ

У рамках розроблення нової моделі для управління обробкою вагонів пропонується інтеграцію НМ разом із спеціалізованими моделями ризику. НМ буде використана для прогнозування поточної затримки вагона на основі пройденого та залишкового шляху, а також витраченого і залишкового часу. Для досягнення більшої точності прогнозу мережа видаватиме результати у вигляді інтервальних або нечітких чисел, що дає змогу врахувати невизначеність у даних.

Однак для покращення якості оцінювання необхідно також урахувувати інформацію від системи АСК ВП УЗ Є, яка здатна приблизно оцінити час прибуття вагона до станції призначення. Ця оцінка може базуватися на тривіальних розрахунках або ж використовувати більш детальну інформацію з поїзних і вагонних моделей полігона чи за допомогою методу «контрольно-часових точок» [113, 114]. Знаючи строк доставлення вантажу, на основі прогнозів системи АСК ВП УЗ Є можна сформувати приблизну оцінку поточної затримки вагона.

Від залізниці, як сфери обслуговування, бізнес-оточення вимагає прозорості дій, дотримання логістичних принципів для доставлення вантажів, що пов'язано з точним прогнозуванням і подальшим дотриманням встановлених часових параметрів договору між учасниками перевезень [115]. Крім того, недотримання графіків просування вагонів створює і цілу низку додаткових проблем: нестачу порожніх вагонів, виникнення додаткових простоїв обладнання і рухомого складу, що в умовах ринкових капіталістичних відносин призводить до значних матеріальних збитків. Тому вже багато дослідників і виробників-практиків наголошують на необхідності вдосконалення технології управління вантажними перевезеннями. Удосконалена технологія має враховувати строк доставлення вантажу, зручність і своєчасність виконання усіх операцій у процесі транспортування в умовах зменшення витрат на доставлення [116].

Ухвалення оптимального управлінського рішення пов'язано з наявністю необхідної, своєчасної, достовірної та повної інформації про виробничий процес в експлуатаційній діяльності транспорту [117].

Сучасні автоматизовані технології, використовувані для управління процесами перевезень, є переважно системами збору та передавання даних, часто здійснювані людиною, а отже, із відставанням від реального часу виконання операції [118]. Тому отримання точної інформації про затримки з системи фактично неможливо ще й цих причин. Однак розроблення нетривіальних методів отримання і оцінювання інформації може значно покращити стан цієї проблеми.

Оцінювання затримки може мати інтервальний характер, що дає змогу визначити верхні і нижні межі часу запізнення. Незважаючи на те, що така оцінка може бути приблизною, вона все ж таки є важливою для підвищення точності моделі ризику. В умовах невизначеності будь-яка інформація має високу цінність, тому інтеграція таких даних у модель поліпшує її функціональність і точність прогнозів. Поєднання НМ із моделями ризику забезпечує більш комплексний і детальний підхід для управління затримками та пріоритезацією обробки вагонів на ТС.

У контексті інтеграції прогнозової інформації з НМ і системи АСК ВП УЗ Є постає питання, як ефективно врахувати обидва джерела даних. Для цього можна застосувати різні підходи для ймовірнісного моделювання, такі як байєсівський підхід [119], теорія Демпстера-Шафера [120], теорія інформаційного поля [121], хмарна теорія [122], теорія нечітких множин [123] та інші, які забезпечують гнучкість у роботі з невизначеністю і неповною інформацією.

Байєсівський підхід для ймовірнісного моделювання базований на оновленні ймовірностей з надходженням нової інформації. У цьому підході ймовірність розглядають як ступінь впевненості в події або гіпотезі. Початкові ймовірності (априорні) корегують з урахуванням нових даних, що дає змогу отримати оновлені ймовірності (апостеріорні). Цей підхід забезпечує гнучкість в адаптації оцінок ймовірностей у відповідь на нові дані і може бути використаний для комбінування прогнозів з НМ і системи АСК ВП УЗ Є.

ТДШ є узагальненням класичної теорії ймовірностей і байєсівського підходу, забезпечуючи більшу гнучкість у роботі з невизначеністю і неповною інформацією. На відміну від традиційних імовірнісних методів, ТДШ поділяє "масу" не тільки на окремі події, а й об'єднання подій [124]. Це є особливо корисним у випадках, коли даних недостатньо для точного визначення ймовірностей. В DST імовірність заміняють функцією маси (або мас-функцією), яка визначає нижню межу впевненості в події на основі наявної інформації.

Використання ТДШ дає змогу інтегрувати інформацію з різних джерел, ураховуючи не лише індивідуальні ймовірності, але й неповну або нечітку інформацію, що забезпечує більш комплексний підхід для управління затримками вагонів. Цей підхід дає змогу краще моделювати ризики і невизначеності, пов'язані з прогнозуванням затримок, і є особливо корисним для підвищення точності і надійності СППР в умовах залізничного транспорту.

У байєсівському підході кожен ймовірність детально визначають і корегують на основі нових даних, щоб оновлювати оцінки у відповідь на отримані відомості. Однак для точного застосування цього підходу необхідні чітко визначені апіорні ймовірності, що може бути складним завданням у випадку неповної або суперечливої інформації. З іншого боку, ТДШ пропонує більш гнучкий спосіб обробки невизначеності, розподіляючи ймовірність між множинами подій, що є корисним у роботі з неповною чи неточною інформацією.

З байєсівським підходом ми оновлюємо ймовірності, використовуючи нові дані, що може бути ускладнено, якщо джерела інформації є суперечливими. Наприклад, якщо перше джерело оцінює ймовірність запізнення вантажного вагона на 30 %, а друге — на 50 %, об'єднання цих оцінок може бути складним і потребуватиме додаткових кроків для узгодження даних.

ТДШ дає змогу ефективніше працювати в умовах конфліктної або неповної інформації, зокрема розподілити масу ймовірності між множинами подій, такими як «вагон запізниться» і «вагон не запізниться», комбінуючи дані з різних джерел і вирішуючи конфлікти. У такий спосіб можна отримати більш обґрунтовану оцінку

ймовірності на основі множини джерел інформації без потреби в точних апіорних ймовірностях.

Отже, ТДШ розширює можливості традиційного байєсівського підходу, даючи інструменти для роботи з більш складними, невизначеними даними, що робить її особливо корисною в умовах неповної чи суперечливої інформації.

Правило комбінації Демпстера [125] є основним елементом ТДШ і служить для об'єднання інформації з різних джерел, поданої у вигляді мас-функцій. Це правило забезпечує агрегацію і оновлення ступенів впевненості для врахування кількох незалежних джерел даних. Важливим аспектом є те, що правило Демпстера також враховує можливу суперечливість між джерелами інформації.

Наприклад, припустимо, що оцінка АСК ВП УЗ Є вказує на можливе запізнення вагона в межах від 1 до 11 годин, що можна подати як трикутне нечітке число. З іншого боку, НМ дає оцінку у вигляді інтервалу від 2 до 6 годин. Хоча Артур Пентланд Демпстер, один із засновників цієї теорії, не узагальнив правило комбінації на нечіткі числа, його дослідження в галузі багатовимірної статистики слугували основою для подальших розроблень у цій сфері. Прихильники його теорії застосовували правила комбінації до нечітких чисел і множин, розробивши різні підходи для цього.

ТДШ має свою складність і потребує глибокого розуміння для ефективного застосування. Вона пропонує потужні інструменти для вирішення завдань з обробки інформації та статистики, які важко вирішити в рамках традиційних імовірнісних моделей. Хоча ця теорія містить кілька невирішених питань і складностей, її можливості у вирішенні надскладних завдань роблять її важливим інструментом для роботи з неповною чи суперечливою інформацією.

Якщо $\tilde{C}$ – це нечітке число, отримане в результаті композиції двох нечітких чисел за правилом Демпстера, тоді функція $\mu_{\tilde{C}}$ в контексті такої задачі може являти собою мас-функцію впевненості в запізненні вагона. Отже, функцію розподілу впевненості в запізненні вагона можна використовувати як аналог імовірності в контексті визначення ризику. У цьому випадку впевненість є ступенем знання або

впевненості в тому, що вагон буде запізнюватися на певний час, а не просто ймовірність запізнення.

Цей підхід поєднує традиційні ймовірнісні методи з ТДШ, даючи можливість більш гнучко і точно визначити ризик. Ризик у цьому контексті може бути визначено як добуток ймовірності запізнення на величину штрафу. Замість використання єдиної ймовірності, яка може бути неточною через неповну інформацію або суперечливі дані, функція впевненості дає змогу врахувати широкий спектр можливих затримок, оцінюючи їх за різними джерелами інформації.

Цей підхід дає змогу:

1. Агрегувати інформацію з різних джерел, таких як оцінки АСК ВП УЗ Є і НМ, з урахуванням точних і нечітких даних.
2. Визначити ступінь впевненості в можливих затримках вагона, що допомагає розрахувати можливі штрафи.
3. Отримати більш точну оцінку ризику, яка враховує не тільки ймовірність запізнення, але і ступінь впевненості в цьому запізненні.

Отже, використання функції впевненості як аналогічної ймовірності у визначенні ризику підвищує точність оцінювання ризиків і відповідно ефективність ухвалення управлінських рішень у контексті залізничного транспорту.

Слід зазначити, що, хоча поняття впевненості може бути використане як аналог ймовірності, воно має суттєві відмінності, особливо в контексті мас-функцій ТДШ. Важливо враховувати ці відмінності для коректного застосування такого підходу.

Рівень впевненості, як і величина ймовірності, не може перевищувати 1, що відповідає загальному принципу обмеження значень у межах від 0 до 1. Однак, на відміну від класичної ймовірності, мас-функції в ТДШ не підлягають такому ж строгому обмеженню, як правило, що сума ймовірностей всіх елементарних результатів має дорівнювати 1. У класичній теорії ймовірностей це правило відображує принцип, що одна з можливих подій обов'язково має відбутися.

У ТДШ замість простого підрахунку ймовірностей для окремих подій розглядають мас-функції, які розподіляють «масу» впевненості не тільки між окремими подіями, а й між їх об'єднаннями. Це дає змогу працювати з неповною та суперечливою інформацією, даючи більш гнучкі можливості для оцінювання невизначеності.

Основні відмінності від класичної ймовірності в контексті ТДШ:

1. ТДШ розподіляє маси не лише на конкретні події, а і їх об'єднання, це допомагає враховувати невизначеність, коли точні ймовірності подій не можуть бути визначені.

2. У ТДШ використовують функцію маси (англ. Belief function), яка визначає впевненість у події, ця функція може включати інформацію про об'єднання подій для моделювання ситуації з неповною або суперечливою інформацією.

3. ТДШ гнучка до неповної або суперечливої інформації і може поєднувати інформацію з різних джерел, що не завжди можливо в рамках класичної теорії ймовірності.

Отже, хоча в ТДШ і дотримуються принципу, що сума мас-функцій дорівнює 1, її підхід до роботи з інформацією про невизначеність відрізняється від класичних імовірнісних моделей, що дає змогу краще враховувати складні ситуації, наприклад для набору подій

$$P(A_1) + P(A_2) + P(A_3) + \dots + P(A_n) = 1. \quad (5.5)$$

Це обмеження забезпечує коректність імовірнісної моделі та гарантує, що ймовірність будь-якого результату знаходиться в межах від 0 до 1. Отже, у ТДШ використовують мас-функції, які поділяють «масу впевненості» не лише на окремі події, а і їх об'єднання. Однією з основних особливостей мас-функцій є те, що сума всіх мас може бути меншою за 1. Це дає змогу враховувати невизначеність і неповноту інформації.

Тож, коли ми говоримо про нечіткі числа в контексті ТДШ, потрібно враховувати, що функція належності може мати площину під графіком, що

перевищує 1, але мас-функція має бути нормалізована так, щоб її значення відповідали вимогам теорії. Це означає, що мас-функції в ТДШ мають відображувати коректний розподіл невизначеності і залишатися в межах, які забезпечують правильне моделювання ймовірностей.

Отже, в умовах неповної інформації ТДШ дає змогу більш гнучко оперувати даними і забезпечує можливість включення нечітких чисел і різних об'єднань подій у загальну ймовірнісну модель, щоб краще відображувати реальні умови та невизначеність, з якими стикаються системи ухвалення рішень.

У ТДШ можна поділяти масу впевненості між різними гіпотезами, при цьому сума мас усіх підмножин, включаючи порожню множину, має дорівнювати 1. Важливо розуміти, що це не виключає можливості перевищення суми впевненості для окремих гіпотез понад 1, оскільки маси можуть бути призначені і об'єднанням гіпотез. Тому отримане нечітке число необхідно нормалізувати.

За методами ТДШ щодо оперування з нечіткими числами [126] і з урахуванням операції нормалізації формула композиції інформації з двох джерел, яка виражена нечіткими числами, матиме такий вигляд:

$$m_{\tilde{C}} = (\mu_{\tilde{A}} \oplus \mu_{\tilde{B}})_{\tilde{C}} = N[\mu_{\tilde{C}}(t_3)] = N \left[\frac{\sum_{\tilde{A} \cap \tilde{B} = \tilde{C}} \mu_{\tilde{A}}(t_3) \cdot \mu_{\tilde{B}}(t_3)}{1 - \sum_{\tilde{A} \cap \tilde{B} = \emptyset} \mu_{\tilde{A}}(t_3) \cdot \mu_{\tilde{B}}(t_3)} \right], \quad (5.6)$$

де t_3 – змінна тривалості затримки доставлення вантажу; $\mu_{\tilde{A}}(t_3), \mu_{\tilde{B}}(t_3)$ – функції належності нечітких чисел $\tilde{A}$ (прогнозна інформація з АСК ВП УЗ Є) і $\tilde{B}$ (прогнозна інформація з НМ); $\tilde{C}$ – нечітке число, яке є результатом агрегації нечітких чисел $\tilde{A}$ і $\tilde{B}$, за правилом Демпстера, з відповідною функцією належності $\mu_{\tilde{C}}(t_3)$, яка відіграє роль мас-функції; $N[\dots]$ – операція нормалізації функції належності; $(\mu_{\tilde{A}} \oplus \mu_{\tilde{B}})_{\tilde{C}}$ – результат композиції у вигляді мас-функції, що подана як

нормалізована функція належності нечіткого числа $\tilde{C}$; $\tilde{\emptyset}$ – порожня нечітка множина.

Нормалізація полягає у множенні функції належності отриманого нечіткого числа на нормалізуючий коефіцієнт:

$$k = \frac{1}{\int_{-\infty}^{+\infty} \mu_{\tilde{C}}(t_3) \cdot dt_3} \quad (5.7)$$

ТДШ є складною та цікавою, але все ще експериментальною, з різноманітними суперечностями. Існує кілька підходів для композиції мас-функцій, поданих як функції належності. Ми вважаємо, що вибраний нами підхід є найбільш зручним і раціональним. Цей підхід включає нормалізацію після композиції. Однак можна також нормалізувати функції належності перед композицією. Перевагою цього підходу є те, що він забезпечує, щоб кожна вихідна функція належності була інтерпретована як мас-функція відповідно до вимог ТДШ. Проте ми вважаємо, що навіть після цього отримана функція належності все одно може потребувати нормалізації.

За винятком деяких особливих випадків, нормалізація все ж таки буде необхідна. Тому в контексті завдання оперативного управління СС під час оптимізації математичної моделі управління станцією, яка, наприклад, використовує ГА, багаторазові ітерації включатимуть перерахунки прогнозних часів затримок для кожного вагона, щоб визначити ризик недотримання строку доставлення вантажів. Такий підхід для композиції є менш зручним і раціональним у контексті цієї задачі. Крім того, підхід із нормалізацією після композиції дає змогу працювати з вихідними нечіткими числами безпосередньо, що також є його перевагою. На рисунку 5.7 подані як власні функції належності вихідні нечіткі числа $\tilde{A}$ і $\tilde{B}$ та нечітке число $\tilde{C}$, що є композицією цих чисел, за правилом Демпстера, але перед виконанням процедури нормалізації.

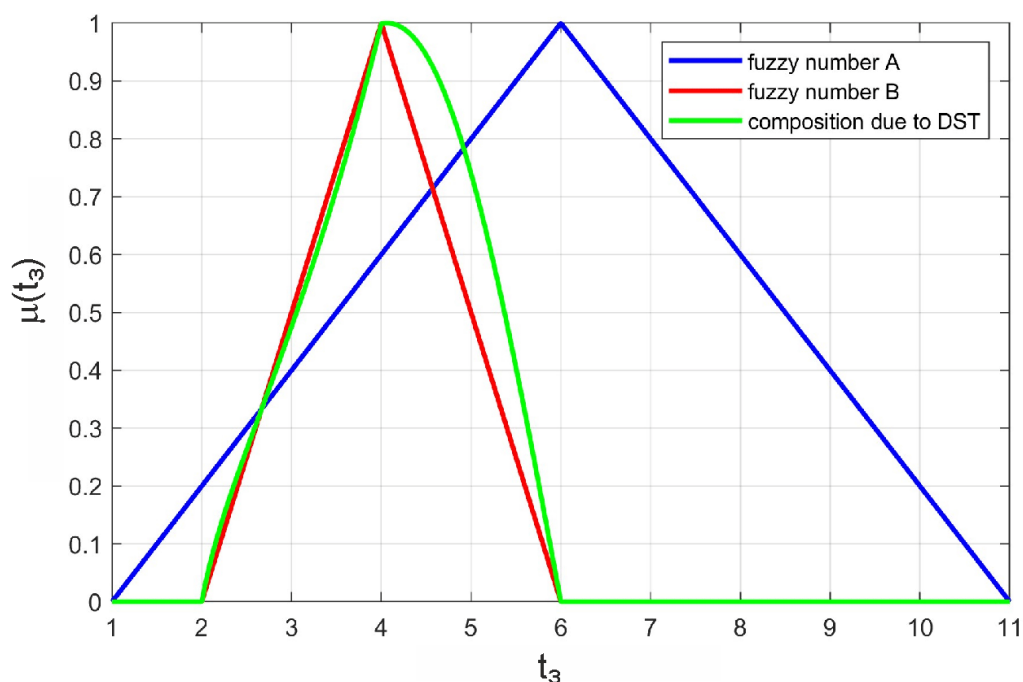


Рисунок 5.7 – Нечіткі числа, що являють собою прогнозні дані системи АСК ВП УЗ Є та НМ щодо впевненості в недотриманні строку прибуття певного вагона на станцію розвантаження, і нечітке число, що є композицією цих нечітких чисел, за правилом Демпстера, але перед виконання процедури нормалізації

На рисунку 5.8 показано нечітке число, отримане в результаті композиції, подане як функція належності після нормалізації, а також результат його дефазифікації за методом центроїда. Тепер функція належності є мас-функцією, яка повністю відповідає вимогам ТДШ.

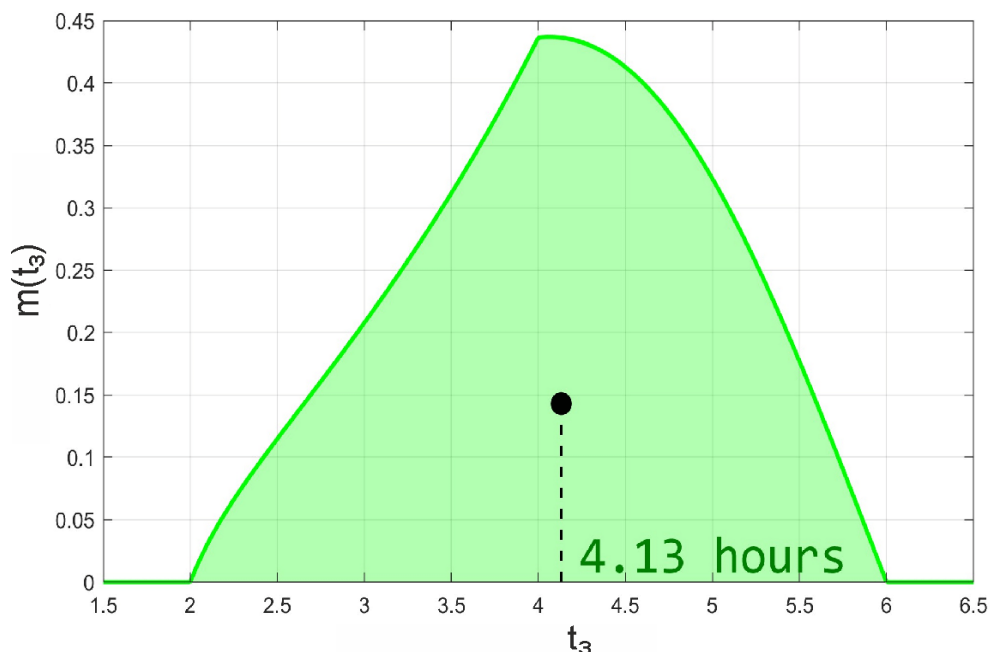


Рисунок 5.8 – Мас-функція впевненості в запізненні вагона, отримана в результаті композиції двох нечітких чисел згідно з ТДШ, яка подана як нормалізоване нечітке число

Отже, у результаті композиції ми отримуємо не тільки ймовірність настання події запізнення, але й функцію розподілу, яка зіставляє значення часу запізнення з їхніми рівнями впевненості у тому, що подія запізнення відбудеться саме з такою (певною) величиною часу затримки.

5.7 Методологія застосування концепції щільності ризику для підвищення точності моделі оцінки нелінійних наслідків затримки вагона на основі інтегрального підходу

Отже, зазначену вище впевненість також можна трактувати і як ймовірність, оскільки мас-функція фактично задовольняє всі відповідні обмеження теорії ймовірностей. Тож ми маємо не лише впевненість у тому, що подія запізнення настане, але й інформацію про час запізнення. Це дає змогу створити більш складну

і точну модель визначення ризику, застосувавши нетривіальний підхід. Однак, якщо детально розглянути цю мас-функцію, стає зрозумілим, що, урахувавши її безперервну природу, її слід інтерпретувати не як функцію ймовірності, а як функцію щільності ймовірності. Тоді добуток мас-функції і штрафної функції матиме розмірність кількість гривень за годину, грн/год, і може бути названий щільністю ризику [127]. Цю щільність ризику можна обчислити як

$$\rho(t_3) = m_{\tilde{C}}(t_3) \Upsilon(t_3, E). \quad (5.8)$$

Тоді функцію ризику можна визначити як

$$R(t_3) = \int_0^{+\infty} m_{\tilde{C}}(t_3) \Upsilon(t_3, E) dt_3, \quad (5.9)$$

де $m_{\tilde{C}}(t_3)$ – мас-функція впевненості в затримці вагона; $\Upsilon(t_3, E)$ – функція штрафу за недотримання строку доставлення вантажу; E – провізна плата.

Такий підхід для визначення ризику є дуже зручним, оскільки, якщо б ми спочатку інтегрували функцію щільності ймовірності, а потім множили її на сталу величину наслідків, такий тривіальний підхід у контексті цієї задачі є абсолютно некоректним. Такий підхід щонайменше не враховує тривалість запізнення і виправданий лише у випадку, коли нараховують фіксовану суму штрафу лише за наявності затримки. У нашому ж випадку величина штрафу залежить від величини затримки вагона, і ця залежність може бути нелінійною. Запропонована модель (5.9) враховує всі можливі варіанти розвитку подій і відповідні до них величини штрафів одночасно.

Розглянемо приклад. Провізна плата становить 1000 грн. Штрафна функція передбачає виплату 1 % суми провізної плати за кожну годину затримки протягом першої доби затримки та 1,5 % суми провізної плати за кожну годину затримки,

починаючи з другої доби. Ця функція втрат або функція штрафу в кусково-лінійній формі може бути записана як

$$\Upsilon(t_3) = \begin{cases} 1000 \cdot 0,01 t_3 & , \text{якщо } 0 \leq t_3 \leq 24 \\ 1000(0,24 + 0,015(t_3 - 24)) & , \text{якщо } 24 < t_3 \end{cases} . \quad (5.10)$$

В абсолютній аналітичній формі її можна записати як

$$\Upsilon(t_3) = 2,5t_3 |t_3 - 24| + 12,5t_3 - 60 . \quad (5.11)$$

Мас-функція впевненості в запізненні вагона подана як нормована трикутна функція належності

$$m(t_3) = \begin{cases} 0 & , \text{якщо } t_3 < -1 \\ (t_3 + 1)/14 & , \text{якщо } -1 \leq t_3 \leq 13 \\ (27 - t_3)/14 & , \text{якщо } 13 < t_3 \leq 27 \\ 0 & , \text{якщо } t_3 > 27 \end{cases} . \quad (5.12)$$

В абсолютній аналітичній формі цю функцію можна записати як

$$m(t_3) = \frac{|t_3 + 1| - 2|t_3 - 13| + |t_3 - 27|}{392} . \quad (5.13)$$

На рисунку 5.9 наведено графіки штрафної функції (1) і мас-функції впевненості в запізненні вагона (2).

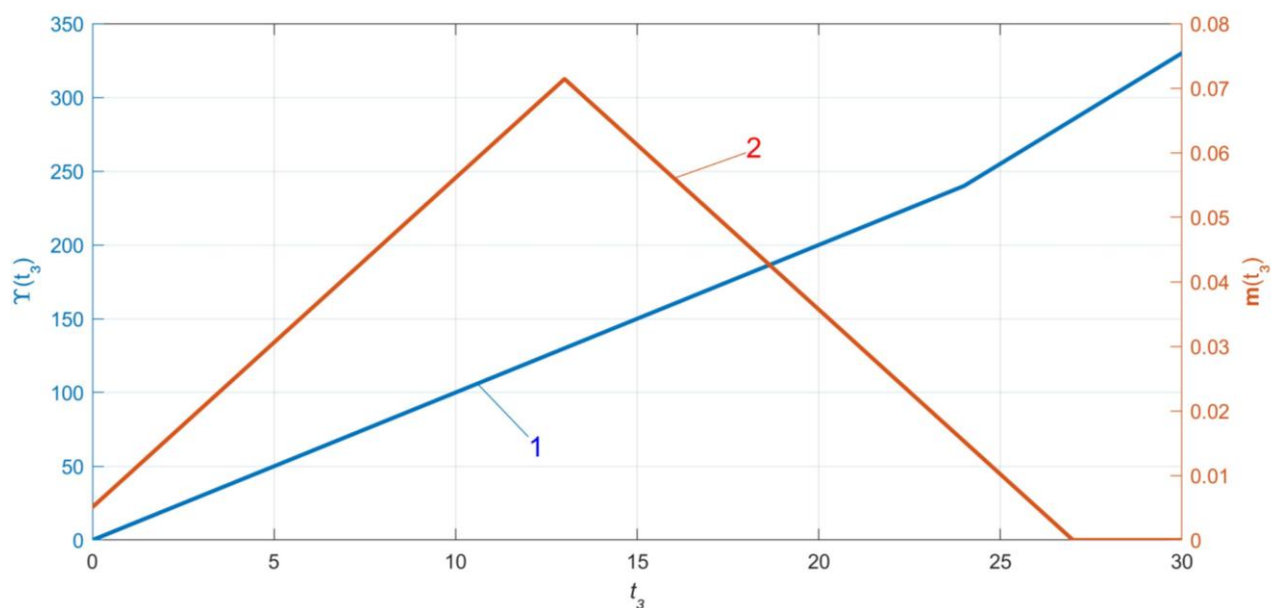


Рисунок 5.9 – Штрафна функція (1) і мас-функція впевненості в запізненні вагона (2)

На рисунку 5.10 показано функцію щільності ризику, яка є добутком штрафної функції та мас-функції впевненості.

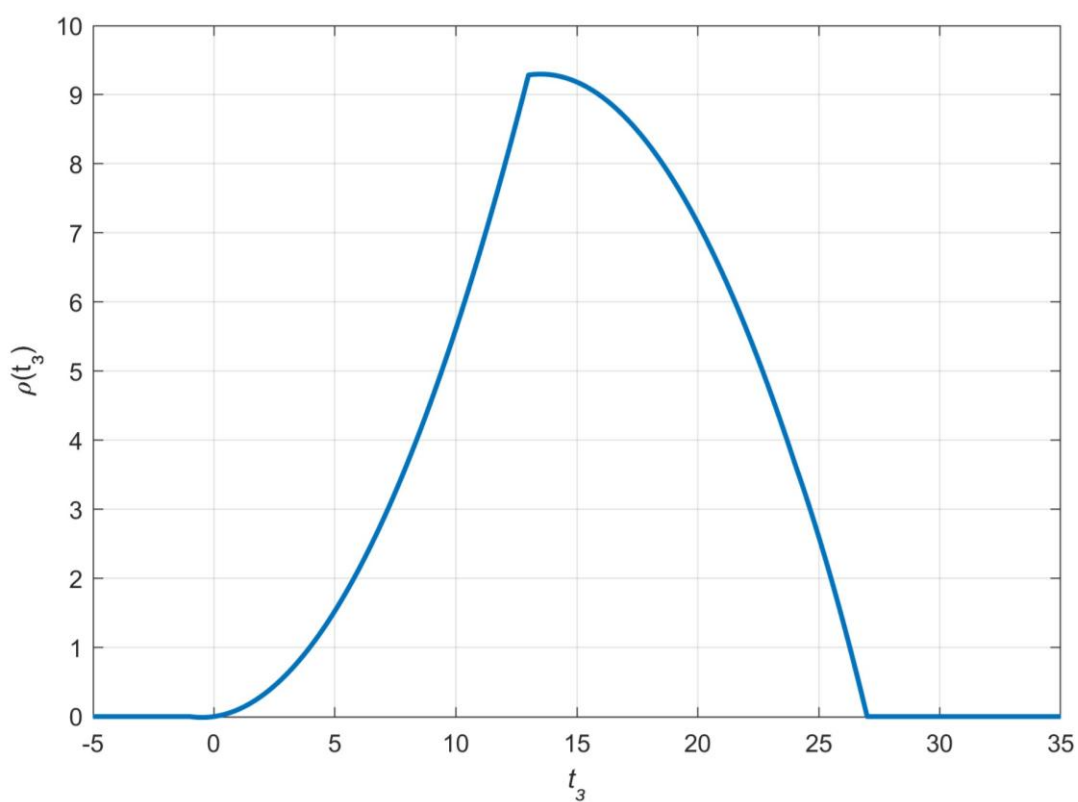


Рисунок 5.10 – Функція щільності ризику

Величину ризику можна розрахувати, обчисливши інтеграл від функції щільності ризику як

$$\begin{aligned}
 R(t_3) &= \int_0^{+\infty} m(t_3) Y(t_3, E) dt_3 = \\
 &= \int_0^{+\infty} \frac{1}{392} (|t_3 + 1| - 2|t_3 - 13| + |t_3 - 27|) (2,5t_3 |t_3 - 24| + 12,5t_3 - 60) dt_3 = \\
 &= (-0,0042517(t_3^3 + 1,5t_3^2 + 3,33067 \cdot 10^{-15}t_3 - 0,5)(\operatorname{sgn}(-t_3 - 1) - 1) \times \\
 &= (\operatorname{sgn}(13 - t_3) + 1) + 0,0042517(t_3^3 - 40,5t_3^2 - 8,99281 \cdot 10^{-14}t_3 + 2197,5) \times \quad (5.14) \\
 &= (\operatorname{sgn}(13 - t_3) - 1)(\operatorname{sgn}(24 - t_3) + 1) + \\
 &= 0,0063776(t_3^3 - 52,5t_3^2 + 648t_3 - 4007)(\operatorname{sgn}(24 - t_3) - 1)(\operatorname{sgn}(27 - t_3) + 1) - \\
 &= 65,0574 \operatorname{sgn}(27 - t_3) + 65,0574 \Big|_0^{+\infty} = 130,12 \text{ грн}
 \end{aligned}$$

За провізної плати 1000 грн величина ризику становила 130,12 грн. Проведені розрахунки величини ризику з використанням концепції щільності ризику дали змогу адекватно врахувати невизначеність, пов'язану зі строком затримки одночасно з нелінійними наслідками, що залежать від цього строку. Отже, метод виявився ефективним для моделювання та оцінювання ризиків, пов'язаних із затримками вантажних вагонів.

5.8 Формалізація процесу оперативного планування роботи технічної станції в умовах невизначеності із використанням методу оцінювання можливих наслідків недотримання строків доставлення вантажів на основі запропонованої ризик-моделі

СС є основною ланкою в технологічному процесі вантажних залізничних перевезень, забезпечуючи ефективний рух товарів і матеріалів через залізничну

мережу. Технологічний процес на СС постійно супроводжений значним рівнем невизначеності, що зумовлено багатьма факторами, такими як варіації у прибутті вагонів, непередбачені затримки, технічні несправності та інші непередбачувані події. Можливості управління СС в режимі реального часу є основними для забезпечення високої ефективності перевізного процесу в сучасних умовах [128].

Крім того, технологічний процес включає велику кількість операцій, кожна з яких має свої унікальні вимоги та часові рамки. Виконання цих операцій потребує залучення численних виконавців і ресурсів, які пов'язаних і залежних один від одного. Усі ці фактори ускладнюють процес планування і управління роботою станції.

У західній постановці задача управління сортувальним двором (англ. SwitchYard) виглядає значно простішою, хоча все одно дуже складною, її іноді формулюють як задачу цілочисельного [129] або змішаного програмування [130]. За американською та західноєвропейською технологією, це фактично задача управління лише СП в українській термінології, або іноді її ставлять навіть як задачу управління маневровою роботою [131] чи управління процесом розформування на гірці [132]. Задача управління СС в умовах залізничної системи України є набагато складнішою, тому що СС це не лише сортувальний двір, а складна система, яка включає, окрім підсистеми розформування-формування, ще щонайменше також підсистеми поїзної та місцевої роботи. І всі ці системи пов'язані між собою.

Через це побудова оптимального оперативного плану роботи СС стає складним завданням, яке можна формалізувати щонайменше як задачу комбінаторної оптимізації, або скоріше за все як задачу, що одночасно поєднує властивості задачі комбінаторної оптимізації і задачі теорії розкладів, адже одночасно необхідно визначити оптимальний порядок виконання операцій, призначити ресурси та визначити моменти часу початку операцій для забезпечення максимальної ефективності та мінімізації затримок [133-135].

Крім того, технологічний процес на СС супроводжений значним рівнем невизначеності, що зумовлено багатьма факторами, такими як варіації у прибутті

вагонів, непередбачені затримки, технічні несправності та інші непередбачувані події. Крім того, технологічний процес включає велику кількість операцій, кожна з яких має свої унікальні вимоги та часові рамки, і виконання цих операцій потребує залучення численних виконавців і ресурсів, пов'язаних і залежних один від одного.

Через це побудова оптимального оперативного плану роботи СС стає складним завданням, яке можна класифікувати як задачу комбінаторної оптимізації. У цій задачі необхідно враховувати великий простір можливих рішень, оскільки вона включає велику кількість можливих комбінацій операцій і призначень ресурсів. Рішення мають дискретну природу, оскільки операції та ресурси подані як дискретні набори, такі як конкретні вагони, колії, бригади. Для досягнення оптимального результату потрібно перебрати велику кількість варіантів, ураховуючи обмеження на ресурси, такі як кількість доступних колій, локомотивів і час робочих змін, а також необхідність дотримання правил безпеки та регламентів. Цільова функція в цьому контексті є складною і багатокритеріальною, оскільки включає оптимізацію часу обробки, витрат, мінімізацію затримок та інших важливих критеріїв.

Крім того, ця задача також має властивості задачі теорії розкладів, де необхідно визначити оптимальний порядок виконання операцій для кожного вагона чи групи вагонів, ураховуючи пріоритети та часові рамки для кожної операції. Призначення ресурсів потребує визначення, які ресурси, локомотиви і бригади, будуть задіяні для виконання певних операцій, щоб уникнути конфліктів і простоїв. Більшість операцій пов'язані та залежні одна від одної, а також конкурують за ресурси, тому необхідно враховувати часові залежності між ними. Невизначеність у часі прибуття і відправлення вагонів, стану обладнання, погодних умов також додає складності в побудову плану, тому потрібні адаптивні плани, що можуть швидко реагувати на зміни.

Успішне розв'язання цієї задачі потребує застосування передових методів і алгоритмів, щоб урахувати всі фактори невизначеності та взаємозалежності, забезпечуючи ефективність і мінімізацію затримок у роботі станції.

Одними із найважливіших, що впливають на процес планування, є технологічні та економічні фактори. Побудова оптимального оперативного плану

роботи СС є складною задачею, яку можна класифікувати як задачу комбінаційної оптимізації та задачі теорії розкладів. У цій задачі необхідно враховувати великий простір можливих розв'язків, оскільки вона включає велику кількість можливих комбінацій операцій і призначень ресурсів. Розв'язки мають дискретну природу, оскільки операції та ресурси подані як дискретні набори, такі як конкретні вагони, колії, бригади. Важливо також урахувати обмеження на ресурси, такі як кількість доступних колій, локомотивів і час робочих змін, а також необхідність дотримання правил безпеки та регламентів. Цільова функція може включати оптимізацію кількох критеріїв, таких як час обробки, витрати, мінімізація затримок.

Успішне розв'язання задачі оптимізації роботи СС потребує застосування передових методів і алгоритмів, щоб урахувати всі фактори невизначеності та взаємозалежності. Цільову функцію, що відповідає критерію експлуатаційних витрат, можна подати як

$$f_1(X) = E_1(X) + E_2(X) + E_3(X) + E_4(X) + E_5(X), \quad (5.15)$$

де $E_1(X)$ – частка експлуатаційних витрат, пов'язана з витратами вагоно-годин у підсистемі розформування/формування; $E_2(X)$ – витрати, пов'язані з витратами вагоно-годин унаслідок перебування вагонів у підсистемі приймання поїздів; $E_3(X)$ – експлуатаційні витрати, пов'язані з витратами вагоно-годин унаслідок перебування вагонів у підсистемі відправлення поїздів; $E_4(X)$ – частка експлуатаційних витрат, пов'язана з маневровою роботою; $E_5(X)$ – частка експлуатаційних витрат, пов'язана з підсистемою місцевої роботи; X – вектор кортежів, $X = \{(d_j, \tau_j^n, o_j^p, \tau_i^p, q_j, \tau_j^{ng}, e_j^m, \tau_j^e)\}$, де d_j – напрямок прямування j -го вагона, тобто номер напрямку за ПФП, на які формує поїзди ця станція, τ_j^n – момент часу прибуття поїзда з j -м вагоном на станцію, o_j^p – порядок (черговість)

розформування поїзда з j -м вагоном на сортувальній гірці або іншим методом, τ_j^p – момент часу закінчення розформування поїзда, з яким прибув до станції j -й вагон, Q_j – колія накопичення у СП, на якому накопичується состав, до складу якого потрапив j -й вагон, τ_j^{ng} – момент часу завершення перестановки сформованого составу, що містить j -й вагон, до парку відправлення, e_j^m – виконавець (маневровий локомотив), що здійснював маневрові операції з j -м вагоном, τ_j^g – момент часу відправлення поїзда у складі з j -м вагоном зі станції.

Для вантажних відправлень напрямки і категорія поїзда, яким вони будуть доставлені, відомі заздалегідь, ця інформація визначена планом формування поїздів, який складають і затверджують на кожен вантажний рік [136, 137].

Для запезпечення керуючого впливу на строки доставлення вантажів з метою зменшення випадків недотримання відповідних строків, вказаних у договорах на здійснення перевезень, і відповідно зменшення штрафних виплат необхідно якось урахувати ризикову складову. Фактично вона також виражена у грошовому еквіваленті і технічно може легко бути агрегована до загального критерію експлуатаційних витрат. І хоча, на перший погляд, може здатися, що ці витрати лише уявні, а не дійсні – це все ж таки не так. На прикладі одного випадку, конкретного вагона на станції, – так, ці витрати можна якоюсь мірою вважати уявними, вірогідними або такими, що можуть відбутися, а можуть і не відбутися. Але якщо ми розглядаємо ситуацію в масштабі станції, то ризикова компонента, якщо вона спирається на адекватну модель з правильно оціненими імовірностями або ступенями впевненості, є саме реальними витратами. Так, дійсно, деякі ризики не будуть реалізовані, однак витрати, пов'язані з їхніми наслідками, у моделі враховані не повністю, а лише відповідно до ступеня впевненості або імовірності. Натомість інша частка ризиків все ж таки буде реалізована, і їхні наслідки в такому випадку будуть більшими, ніж враховані моделлю, адже ймовірність достовірної події 1 є більшою за ймовірність, враховану в ризиковій моделі. Отже, частка наслідків реалізованого ризику буде компенсована відсутністю наслідків тих

ризиків, реалізація яких не відбудеться. Величина ризику в цьому випадку фактично відображує реальні витрати. І чим точнішою буде модель оцінювання ризику, пов'язаного з кожним окремим вагоном, тим більш точною буде загальна оцінка ризикової компоненти витрат і відповідно більш оптимальні управлінські рішення будуть знайдені в процесі оптимізації моделі.

Однак, як було зазначено вище, вимоги до створення СППР вказують на неприпустимість використання «чорних ящиків» і безальтернативних механізмів вироблення рішень. Виходячи з цього агрегація ризикової компоненти до складу цільової функції експлуатаційних витрат є недоцільною. Критерій ризику доцільно врахувати у вигляді окремої цільової функції

$$f_2(X) = \sum_{j=1}^{\#W} R_j(X_j), \quad (5.16)$$

де W – множина вагонів, що є вагонообігом станції, що відповідає вибраному горизонту планування, $\#W$ – це потужність цієї множини; $R_j(X_j)$ – величина ризику, пов'язаного з можливістю недотримання строку доставлення вантажу j -м вагоном.

Маємо багатокритеріальну модель, множину критеріїв якої можна подати як вектор, що складається в цьому випадку з двох елементів. Кожен критерій подано як окрему цільову функцію. Отже, у такому вигляді задачу забезпечення своєчасного доставлення вантажів у рамках процесу оперативного планування роботи ТС, окрім усіх зазначених вище класифікацій перш за все потрібно класифікувати як задачу векторної оптимізації [138], яку можна подати як

$$\begin{cases} f_i(X) \rightarrow \min, & i = (\overline{1, 2}) \\ X \in \Omega \end{cases}, \quad (5.17)$$

де Ω – область припустимих рішень.

Крім того, для забезпечення пошуку рішень саме лише в межах простору Ω на змінні моделі необхідно накласти такі технічні обмеження:

$$\left\{ \begin{array}{l} (\tau_i^n = \tau_j^n) \wedge (d_i = d_j) \Rightarrow (o_i^p, m_j, \tau_i^{ng}, e_i^M, \tau_i^e) = (o_j^p, \tau_j^{ng}, e_j^M, \tau_j^e), \quad \forall i, j \in W \\ (\tau_i^n = \tau_j^n) \wedge (d_i \neq d_j) \Rightarrow (o_i^p = o_j^p) \wedge ((\tau_i^{ng}, \tau_i^e, m_i) \neq (\tau_j^{ng}, \tau_j^e, m_j)), \quad \forall i, j \in W \\ (\tau_i^e = \tau_j^e) \Rightarrow (m_i, \tau_i^{ng}, e_i^M) = (m_j, \tau_j^{ng}, e_j^M), \quad \forall i, j \in W \end{array} \right. \quad (5.18)$$

Перше обмеження забезпечує рівність усіх параметрів кортежів для тих вагонів, у яких такі параметри, як час прибуття на станцію і напрямок прямування, співпадають. Адже, якщо час прибуття у вагонів співпадає, це свідчить про те, що такі вагони прибули до станції в одному поїзді. Той факт, що й напрямок прямування вагонів співпадає, означає, що ці вагони після переформування також будуть відправлені разом в одному поїзді, адже ми розглядаємо варіант технології роботи підсистеми розформування/формування ТС з формуванням составів без залишку вагонів на коліях СП. Друге обмеження констатує той факт, що коректний варіант вектора має містити такі кортежі з параметрами вагонів, що якщо у вагонів співпадає час прибуття, але не співпадає напрямок прямування, то в них також має співпадати порядок розформування, але час перестановки в парк відправлення та час відправлення зі станції мають бути різними. Третє обмеження забезпечує рівність моментів часу переставлення вагонів до парку відправлення та виконання маневрових операцій для тих вагонів, у яких час відправлення співпадає, адже якщо ці вагони відправлені у складі одного поїзда, то й параметри операцій зі сформованим составом у них також мають співпадати.

Також необхідне виконання технологічних обмежень

$$\left\{ \begin{array}{l} \sum_{i \in W} I(q_i = k \wedge t > \tau_i^p \wedge t \leq \tau_i^{ne}) \leq m_k^{\max}, \quad \forall k \in K, t \\ \left(\sum_{i \in W} I(\tau_i^e = \tau^{ep}) \leq m_{d_i}^{\max} \right) \wedge \left(\sum_{i \in W} I(\tau_i^e = \tau^{ep}) \geq m_{d_i}^{\min} \right), \quad \forall \tau^{ep} \in T^{ep}, \\ R_i(X_i) \leq R^{\max}, \quad \forall i \in W \end{array} \right. , (5.19)$$

де q_i – колія СП, на якій відбувається накопичення состава, до складу якого входить i -й вагон; K – множина колій СП; k – пересічний елемент множини K ; $m_k^{\max}$ – максимальна місткість колії k СП, умов. ваг; T^{ep} – множина ниток ГРП, які можна використовувати для відправлення вантажних поїздів зі станції; τ^{ep} – пересічний елемент множини T^{ep} ; $m_{d_i}^{\min}, m_{d_i}^{\max}$ – нормативна мінімальна і максимальна кількість вагонів у складі поїзда на ділянці, яка відповідає напрямку d_i прямування i -го вагона; $R_i(X_i)$ – поточне значення величини ризику, пов'язаного з впевненістю в затримці доставлення вантажу; $I(\dots)$ – індикаторна функція, яка набуває значення 1, якщо її аргумент, поданий як логічний вираз, набуває значення True, і 0, якщо аргумент набуває значення False.

5.9 Моделювання процесу оперативного планування роботи технічної станції в умовах невизначеності

Для моделювання процесу оперативного планування роботи ТС в умовах невизначеності було зроблено програмне забезпечення на основі сформованої оптимізаційної моделі. Крім того, створений програмний продукт містить процедуру оптимізації моделі. З огляду на те, що сформована математична модель належить до класу моделей багатоцільової або векторної оптимізації, як механізм оптимізації застосовано відповідний спеціалізований алгоритм SPEA-2 [139].

Алгоритм SPEA-2 (англ. Strength Pareto Evolutionary Algorithm 2) є

еволюційним методом оптимізації, розробленим для розв'язання задач багатокритеріальної оптимізації. Він базований на ідеї архіву Парето [140] і здатен ефективно знаходити компромісні рішення між кількома суперечливими цілями. Спочатку генерується випадкова популяція індивідів і створюється архів Парето для збереження недомінованих рішень. Кожен індивід оцінюють за кількома критеріями і недоміновані індивіди додають до архіву.

Для формування вторинної популяції з архіву Парето вибирають підмножину індивідів з урахуванням рангів і відстаней до найближчих сусідів, щоб забезпечити різноманітність і рівномірне покриття фронту Парето. Застосовують генетичні оператори (кросовер і мутація) для генерації нових індивідів, що сприяє дослідженню нових областей простору рішень і покращенню пристосованості популяції. Архів Парето оновлюється з урахуванням нової популяції індивідів, при цьому відбір індивідів в архів базований на їхньому рангу і щільності розподілу.

Алгоритм продовжує роботу до досягнення заданої кількості поколінь або досягнення стабілізації рішень. SPEA-2 дає змогу знаходити рівномірно розподілені рішення на фронті Парето [141], адаптується до різних форм фронту Парето і задач оптимізації, а також може бути легко паралелізований для прискорення обчислень. Алгоритм широко використовують у різних сферах, включаючи інженерні застосування, фінансову математику, біоінформатику та інші, де необхідно розв'язувати задачі оптимізації з урахуванням множинних цільових функцій і компромісних рішень.

У задачі для вибору оптимального рішення з множини Парето-фронту застосовано метод функції корисності [142]. З цією метою була використана функція корисності

$$U(f_1, f_2) = \alpha + \beta \left(1 - \sqrt{f_1^2 + f_2^2}\right) + w_1 \lambda \tanh(-\gamma f_1) + w_2 \mu \ln\left(\frac{1}{1 + \delta f_2}\right), \quad (5.20)$$

де f_1, f_2 – значення цільових функцій; w_1, w_2 – вагові коефіцієнти, що відповідають цільовим критеріям; $\alpha, \beta, \gamma, \delta, \lambda, \mu$ – коефіцієнти.

Ця функція враховує лінійні і нелінійні компоненти і вибрана на основі декількох підстав.

Першою підставою є необхідність збалансованого розгляду цілей. Функція корисності дає змогу збалансувати дві конкуруючі цілі: мінімізацію ризику та мінімізацію експлуатаційних витрат. Логарифмічна функції та функція гіперболічного тангенса забезпечують різний вплив кожної з цілей, щоб більш гнучко реагувати на зміни в даних і перевагах.

Наступною підставою є необхідність урахування зниження чутливості до змін цілей. Логарифмічна компонента моделює спадну граничну корисність для ризику. Це означає, що збільшення ризику на високому рівні має менший вплив на загальну корисність, що відповідає реальному сприйняттю ризику, коли невеликі збільшення і без того великих значень величин ризику сприймані менш критично.

Компонента, що використовує функцію гіперболічного тангенса, є різким зниження корисності зі збільшенням експлуатаційних витрат. Це важливо для того, щоб висока вартість суттєво знижувала загальну корисність, що відображує реальний вплив високих витрат на рішення.

Наступною підставою вибору саме такого вигляду функції корисності була необхідність забезпечення гнучкості та адаптивності, особливо з огляду на можливість подальшого застосування такої моделі у складі СППР. Параметри α та β регулюють відносну важливість кожної цілі. Це робить функцію корисності гнучкою та адаптивною до змін у пріоритетах і вподобаннях.

Перевагою цієї функції також є математична простота і обчислювальна ефективність, адже логарифмічні та експоненційні функції легко обчислювані і мають хороші математичні властивості для оптимізації. Вони дають змогу уникнути проблем із нечисловими значеннями та забезпечують гладкість функції корисності.

Наступною підставою вибору цієї функції була також необхідність урахування сучасних уявлень і тенденцій у сфері ризик-менеджменту. Використання логарифмічної та експоненційної функцій корисності добре узгоджується з теоріями вподобань (англ. *preference theory*) [143] і ризик-менеджменту, такими як теорія перспектив Канемана-Тверські [144], де розглядають аналогічні нелінійні функції

корисності для моделювання реальних людських переваг.

Ця нетривіальна функція корисності забезпечує більш точне та реалістичне моделювання вподобань осіб, що приймають рішення (ОПР) для оперативного планування роботи станції. Вона враховує лінійні та нелінійні аспекти залежностей, що робить вибір оптимального рішення більш обґрунтованим і узгодженим із реальними умовами технологічного процесу.

Значення технічних і вагових коефіцієнтів, застосовані у складі запропонованої функції корисності під час моделювання, наведені в таблиці 5.1.

Таблиця 5.1 – Технічні і вагові коефіцієнти функції корисності

коефіцієнт	α	β	γ	δ	λ	μ	w_1	w_2
значення	0,8	1	1	1	0,2	0,2	0,5	0,5

Результати моделювання наведені в таблиці 5.2.

Таблиця 5.2 – Результати моделювання

# елемента	f_1	f_2	$U(f_1, f_2)$
1	179557.47	4021.23	0.72384
2	178995.92	4521.49	0.77898
3	178615.43	5918.29	0.78473
4	178527.09	6196.23	0.78412
5	177377.01	8117.54	0.80400
6	176909.80	9164.39	0.77379
7	176719.96	9782.72	0.74126
8	176180.48	11105.18	0.66828
9	176172.99	11327.77	0.64819
10	175741.44	11460.58	0.66624
11	174663.34	11479.83	0.73521
12	174065.66	12658.64	0.64465
13	170133.40	13637.37	0.73069

Елемент № 5 Парето-фронт (таблиця 5.2) є оптимальним рішенням згідно з функцією корисності.

На рисунку 5.11 наведений так званий Парето-фронт, сформований множиною найкращих із можливих рішень, що є варіантами оперативного плану управління роботою ТС. Також на рисунку наведене оптимальне рішення, отримане з множини

Парето за допомогою методу функції корисності, а також наведені особливі точки множини Парето: якірні точки, ідеальна точка і точка надір.

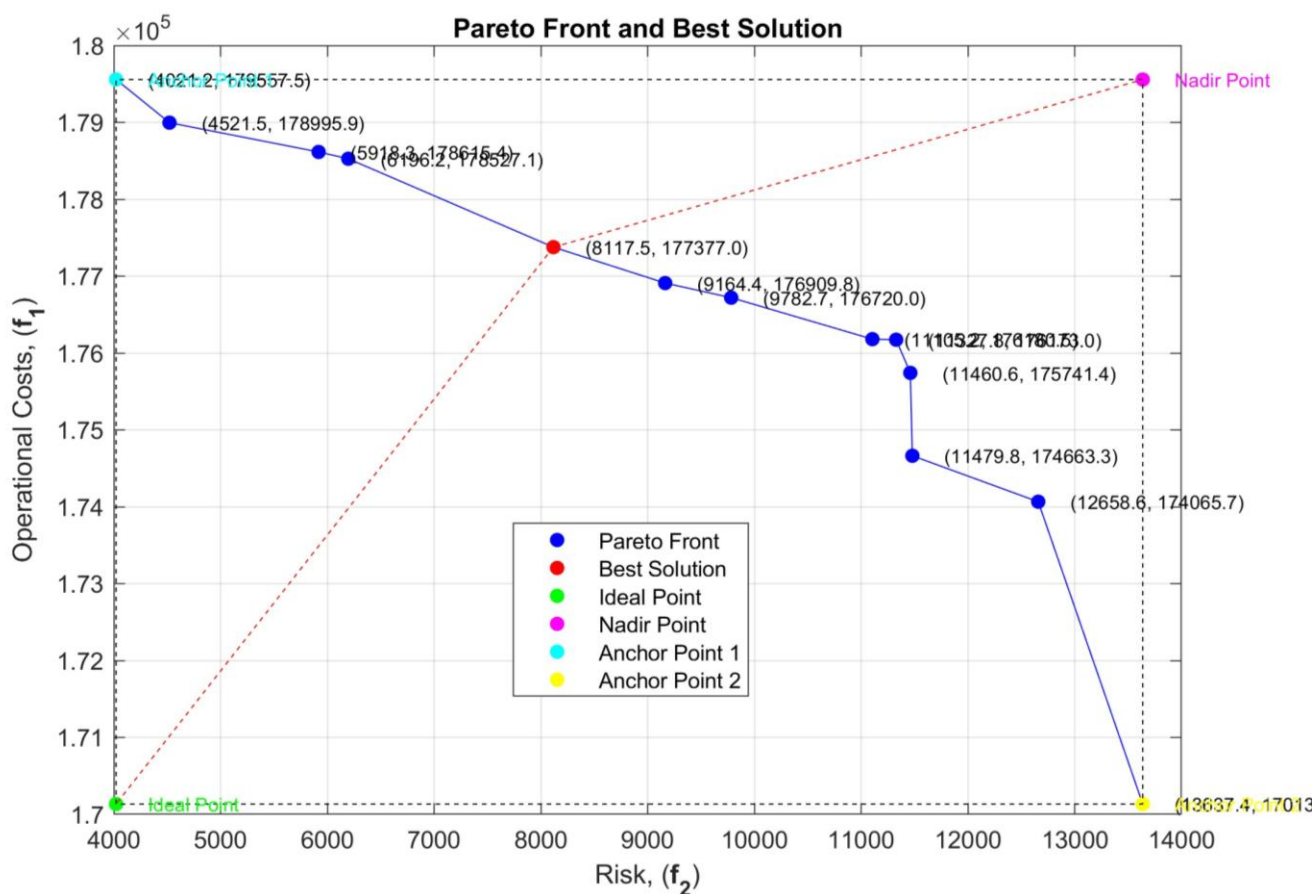


Рисунок 5.11 – Парето-фронт векторів рішень, отриманий у результаті оптимізації, і референсні точки

У складі сформованого програмного продукту також є модуль для графічної інтерпретації отриманого рішення. На рисунку 5.12 наведений отриманий план-графік роботи ТС, яка виконує сортувальну та місцеву роботу.

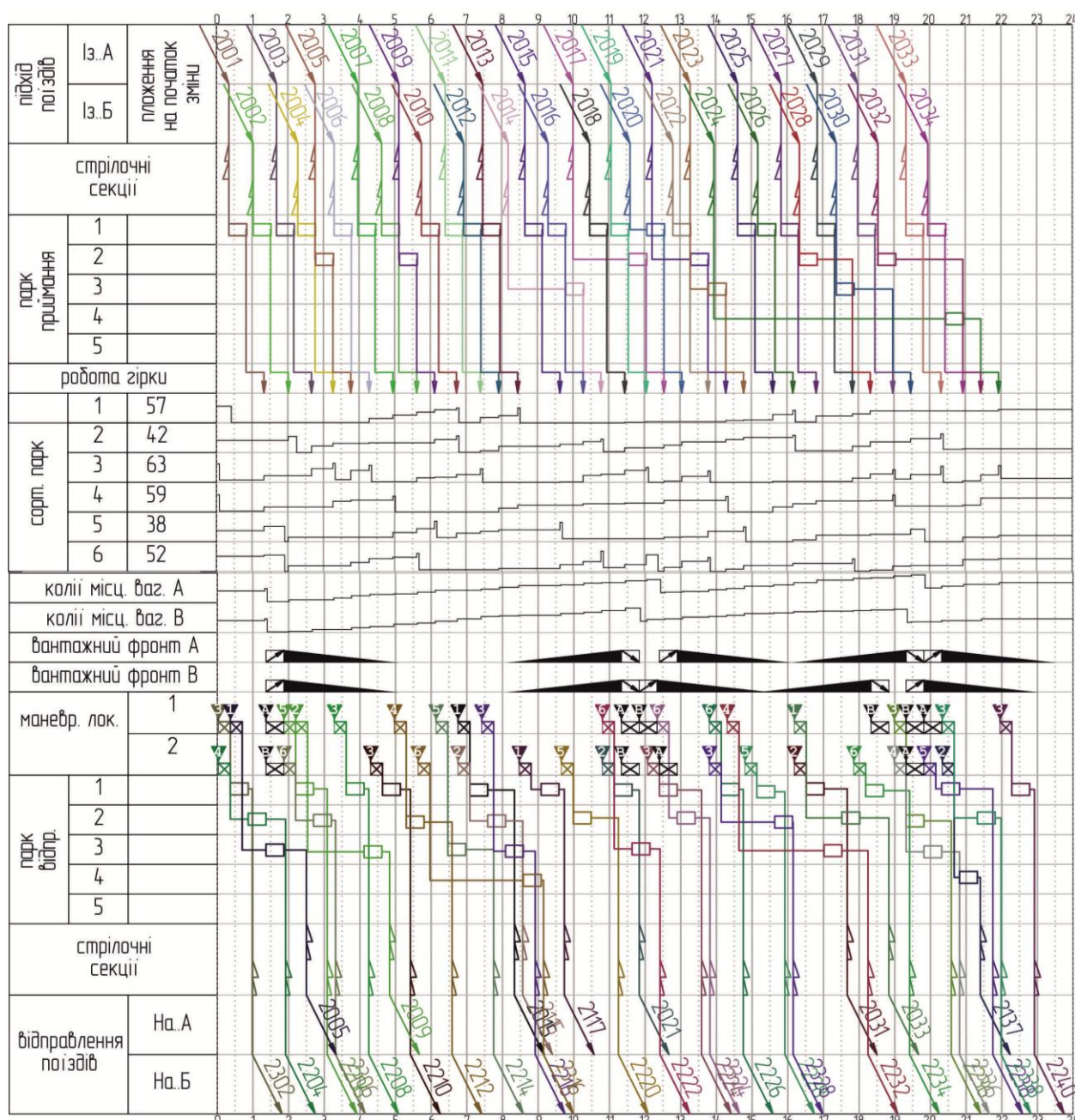


Рисунок 5.12 – Добовий план-графік роботи станції, отриманий у результаті оптимізації

На рисунку Д.1 (додаток Д) наведені діаграми накопичення вгонів на коліях СП, отримані в результаті оптимізації за допомогою розробленої моделі. Також виконано моделювання процесу управління станцією із застосуванням звичайної технології оперативного планування, тобто без детальної оптимізації послідовності виконання операцій і врахування ризиків, пов'язаних із можливими затримками

доставлення вантажів. Отриманий план-графік роботи ТС і діаграма накопичення вагонів, отримані з використанням традиційної технології, наведені на рисунках Д.2 і Д.3 (додаток Д). У таблиці 5.3 наведені значення цільових функцій моделі, що відповідають обом варіантам плану.

Таблиця 5.3 – Значення цільових функцій отриманих варіантів плану

показник \ технологія	традиційна	на основі моделі	різниця	%
Експлуатаційні витрати f_1 , грн	192785,4	177377,0	-15408,4	-7,99
Величина ризику f_2 , грн	21588,9	8117,5	-13471,4	-62,4

У таблиці 5.4 наведені деякі технологічні показники плану роботи станції [145, 146], отриманого за традиційною технологією, і плану, отриманого з використанням запропонованої моделі.

Таблиця 5.4 – Технологічні показники отриманих варіантів плану

№	Найменування показника	Од. вим.	Значення за традиційною технологією	Значення на основі моделі	Різниця
1	середній час знаходження вагона в парку приймання	год:хв	00:42	00:51	+00:09
2	середній час простою вагона під накопиченням	год:хв	02:43	02:33	-00:10
3	середній час знаходження вагона в парку відправлення	год:хв	01:03	00:53	-00:10
4	середній час знаходження вагона на станції	год:хв	06:01	05:52	-00:09
5	середній час очікування подавання місцевого вагона	год:хв	07:51	07:59	+00:08
6	середній час знаходження місцевого вагона під однією вантажною операцією	год:хв	04:25	04:33	+00:08
7	середній час знаходження місцевого вагона на станції	год:хв	21:30	21:43	+00:13
8	середній робочий парк вагонів	ваг	445.93	435.14	-10.79
9	вагонообіг станції	ваг	3714	3714	0
10	коефіцієнт використання гіркових механізмів	од	0.7083	0.7083	0
11	коефіцієнт використання маневрового локомотива № 1	од	0.3164	0.3811	+0.0647
12	коефіцієнт використання маневрового локомотива № 2	од	0.3309	0.3758	+0.0449
13	витрати вагоно-годин у підсистемі розформування/формування	ваг·год	4210.8	3905,0	-305,8

За результатами моделювання використання запропонованої оптимізаційної моделі можна не лише зменшити загальні експлуатаційні витрати на 7,99 %, але й кардинально, а саме на 62,4 %, знизити рівень ризику, пов'язаний із можливістю недотримання строку доставлення вантажів вагонами, що прибувають на ТС.

Величина сукупного ризику для застосування традиційної технології управління становила 21588,9 грн, що є значно більшою величиною, ніж величина ризику, що відповідає найгіршому за відповідним критерієм елементу отриманої в процесі оптимізації Парето множини варіантів рішень. Отже, отриманий результат свідчить про те, що за повної відсутності контролю за відповідним параметром ризику його рівень може досягати значних величин, навіть співставних із загальними експлуатаційними витратами станції, адже об'єктом моделювання вибрано ТС, яка в підсистемі розформування/формування має лише шість колій для накопичення составів і добовий вагонообіг якої склав 3714 вагонів. СС мають щонайменше декілька десятків колій у СП і набагато більший вагонообіг.

Аналіз технологічних показників обох варіантів показав, що деякі показники плану, отриманого на основі моделі, є кращими за показники варіанта плану, отриманого за традиційною технологією планування, а деякі гірші. Так, зменшення витрат вагоно-годин на 305,8 од. у підсистемі розформування/формування може здатися помітним, але все ж таки не дуже суттєвим результатом, однак у масштабах навіть середньої ТС воно має значення. Однак слід зазначити, що ця різниця все одно не є кардинальною.

Той факт, що технологічні показники плану, отриманого на основі моделі, не є такими, що значно переважають показники традиційного плану, свідчить і про те, що для побудови плану на основі моделі помітна частка ресурсів витрачена на зниження рівня ризику, адже критерії технологічних витрат і ризику є переважно конкуруючими між собою. Про це свідчить також і той факт, що показники плану, отриманого на основі моделі, пов'язані з місцевою роботою, є гіршими, хоча й не суттєво, за відповідні показники плану, отриманого за традиційною технологією. Цей феномен можна пояснити тим, що зниження рівня ризику потребує виконання додаткової маневрової роботи, однак маневрові ресурси завжди є обмеженими, і в

такий спосіб знижена частота виконання операцій у підсистемі місцевої роботи, і відповідно зростають невикористані просторі місцевих вагонів. Цей феномен також підтверджений значеннями коефіцієнтів використання маневрових локомотивів, які за варіантом плану, отриманого за допомогою моделі, хоча й не суттєво, але є вищими.

Крім того, аналізуючи отримане компромісне рішення та Парето-множину рішень у цілому, слід зазначити, що за однокритеріальним підходом та сукупною величиною загальних витрат воно формально гірше за рішення, яке можна було б отримати, застосувавши однокритеріальний підхід на основі адитивної згортки критеріїв. Така ситуація відбувається за рахунок того, що в такому випадку компроміс є нерівнозначним з огляду на те, що обидва критерії виражені в одному вимірнику – грошовому еквіваленті. Отже, як можна бачити з рисунку 5.11, для значної частки елементів множини Парето покращення рішення за критерієм ризику потребує більших витрат ресурсів, що відповідають технологічним витратам станції. Дійсно, покращення одного критерію завжди відбувається за рахунок іншого критерію, однак наскільки воно доцільне і яким є оптимальний рівень цієї доцільності – це вже відповідальність особи, яка приймає рішення (ОПР), політики керівництва станції та політики управління залізничною системою.

Однак результати моделювання підтвердили той факт, що підхід для побудови оптимізаційної моделі на основі векторної оптимізації є виправданим навіть у випадку, коли критерії мають один вимірник. Він, на відміну від однокритеріального підходу, дає змогу гнучко управляти політикою компромісу між критеріями та здатний забезпечити ОПР достатньою і якісною множиною конкурентних рішень, що особливо важливо з огляду на вимоги до СППР, які і є цільовим призначенням розроблених моделей. Крім того, такі моделі в майбутньому доцільно поєднати в єдину систему управління перевізним процесом на основі концепції контролінгу [147].

Хоча проблема недотримання строків доставлення вантажів і є комплексною, однак ТС - значне джерело резервів, якщо не для повного її вирішення, то для значного покращення її стану.

Отже, розроблені моделі закладають принципи і теоретичні основи автоматизованих систем управління, спрямовані на подолання проблеми масового недотримання строків доставлення вантажів залізничним транспортом, адже незважаючи на постійно збільшувану гостроту проблеми, їй поки що приділяють недостатньо уваги, особливо в контексті автоматизації і цифровізації процесів управління.

5.10 Висновки до п'ятого розділу

Як виявив аналіз, недотримання строків доставлення вантажів є однією з найбільших сучасних проблем АТ «Укрзалізниця», що призводить не лише до значних збитків залізничних підприємств за рахунок необхідності виплати штрафів, але і репутаційних втрат, а саме часткової втрати довіри до неї як надійного перевізника.

Основними причинами цього явища є зношеність інфраструктури, технічні збої, недостатня кількість магістральних і маневрових локомотивів і вантажних вагонів, організаційні фактори, що дають змогу отримати замовлення на перевезення більше, ніж реальні перевізні можливості, а також вплив погодних умов, негативний вплив людського фактора та інших непередбачуваних обставин, невід'ємно притаманних перевізному процесу.

Однак одним із найважливіших факторів є недосконалість технологій планування перевезень та управління залізничними технологічними об'єктами зокрема. Прикладання зусиль саме в цьому напрямі видається найбільш раціональним і таким, що матиме найбільшу віддачу. До того ж через частку часу загальної тривалості перевезень, яку витрачають вантажні вагони, перебуваючи на ТС, саме вони і є першочерговим джерелом резервів для вирішення цієї проблеми.

Дослідження, подані в цьому розділі, зосереджені на вирішенні проблеми на лінійному рівні, а саме рівні ТС, адже переважну більшість важливих рішень про

перевізний процес ухвалюють саме на рівні оперативного управління. Однак складність технологій оперативного управління ТС полягає в тому, що воно пов'язане з необхідністю вирішення масштабних нетривіальних задач практично в режимі онлайн і до того ж в умовах невизначеності.

Можливими шляхами вирішення цієї проблеми запропоновано методи ідентифікації вагонів, які потенційно несуть таку загрозу, і визначення ступенів наслідків із метою зменшення строку їх перебування на станції та пришвидшення їх відправлення у складі поїздів.

Запропоновано модель визначення пріоритетності обробки вагонів на основі їхніх поточних параметрів, таких як поточна затримка, залишковий час прямування та провізна плата (саме від неї залежить величина наслідків у вигляді штрафів). Запропонована модель побудована на основі НМ, використовуваної для навчання історичних даних. Однак, незважаючи на компактність і відносну простоту моделі, вона виявилася негнучкою і такою, що не відповідає вимогам до моделей, використовуваних у складі СППР. До того ж виявлено, що система АСК ВП УЗ Є має певну поточну актуальну інформацію, що може бути використана в цьому контексті, хоча така інформація може бути не досить точною і чіткою. Для підвищення якості моделей, зокрема і цієї інформації, розроблено модель на основі ТДШ, що дає змогу врахувати цю інформацію разом з іншими джерелами інформації: такі самі нейронні моделі, прогнознi системи тощо, навіть за наявності протиріч. Задачу вирішено завдяки запропонованій композиції даних, поданих як нечіткі числа, на основі правила Демпстера. Ефективність запропонованого методу доведена розрахунками.

Аналіз проблеми недотримання строків доставлення вантажів АТ «Укрзалізниця» показав, що однією з головних причин є фактична відсутність систем ризик-менеджменту, застосовуваних для вирішення цієї проблеми. У такому контексті ризик затримки вантажу оцінено через імовірність запізнення вагона та відповідні штрафи, які залежать від тривалості затримки і, крім того, можуть мати нелінійну природу.

Для моделювання цієї проблеми запропоновано функцію щільності ризику, визначену як добуток мас-функції впевненості в затримці вагона на штрафну функцію. Мас-функція впевненості оцінює ймовірність затримки на основі історичних даних, поточних параметрів вагона та операційної ситуації. Штрафна функція відображує фінансові втрати, які залежать від тривалості затримки та мають нелінійний характер, тобто штрафи зростають швидше зі збільшенням затримки.

Ця модель дає змогу визначати пріоритетність обробки вагонів на ТС, зосереджуючись на мінімізації загального ризику затримок. Важливим аспектом у формуванні функції щільності ризику є інтеграція ТДШ, яка допомагає обробляти нечітку та невизначену інформацію з урахуванням різних джерел даних і оцінювати ризику точніше.

Для аналізу ефективності запропонованої моделі оцінювання ризику сформовано оптимізаційну модель оперативного планування роботи ТС на основі принципів векторної оптимізації, що має дві цільові функції, які відповідають двом критеріям: сумарним експлуатаційним витратам і сумарній величині ризику затримки доставлення вантажів.

Цільова функція, що відповідає сумарним експлуатаційним витратам, ураховує витрати, що безпосередньо виникають з реалізацією технологічного процесу роботи станції, включаючи витрати, пов'язані з вагоно-годинами перебування рухомого складу в підсистемах станції як зі здійсненням операцій, так і під час простою, витрати на маневрові операції, забезпечення виконання місцевої роботи тощо.

Друга цільова функція, що відповідає сумарній величині ризику, базована на раніше розробленій моделі щільності ризику, яка враховує впевненість у затримці вагонів і пов'язані з цим фінансові втрати через штрафи.

Для моделювання розроблене програмне забезпечення мовами Matlab та C#, що, крім оптимізаційної моделі, також реалізують і процедуру її оптимізації, процедуру визначення оптимального компромісного рішення, а також модуль графічної інтерпретації отриманого рішення у вигляді плану-графіку роботи станції.

Розроблена процедура отримання Парето-множини рішень моделі базована на еволюційному алгоритмі векторної оптимізації SPEA-2.

Для виділення з Парето-множини оптимального компромісного рішення розроблено процедуру на основі методу функцій корисності. З цією метою сформована функція корисності, яка відповідає специфіці такої задачі.

Використання оптимізаційної моделі дало змогу зменшити загальні експлуатаційні витрати на 7,99 % і знизити рівень ризику, пов'язаного з можливим недотриманням строків доставлення вантажів, на 62,4 %. Це свідчить про суттєве покращення основних показників ефективності роботи станції, зокрема управління ризиками.

Загалом отримані результати свідчать про значний потенціал запропонованої оптимізаційної моделі для підвищення ефективності функціонування ТС. Її застосування дає змогу досягти суттєвого зниження експлуатаційних витрат і ризиків за незначного погіршення окремих технологічних показників. Це демонструє доцільність і ефективність використання подібних моделей в управлінні залізничними перевезеннями.

Дослідження, подані в цьому розділі, демонструють важливість інтеграції сучасних технологій у процес оперативного управління залізничними ТС. Використання передових методів аналізу та прогнозування зменшує вплив невизначеності, забезпечує своєчасне доставлення вантажів, знижує витрати на штрафи і покращує репутацію АТ «Укрзалізниця» як надійного перевізника.

Отже, розроблені моделі і методи разом являють собою технологію ризик-менеджменту, спрямовану на вирішення поки що однієї проблеми, пов'язаної з невизначеністю та ризиками, - запобігання недотримання строків доставлення вантажів залізничним транспортом шляхом удосконалення процесу оперативного управління ТС. Однак вона дає також можливість інтеграції до її складу й інших компонентів для вирішення різних завдань управління перевізним процесом на рівні станцій. Тож цю технологію доцільно використати як основу для подальшої автоматизації і цифровізації перевізного процесу на залізниці.

РОЗДІЛ 6

ПЛАНУВАННЯ ПАСАЖИРСЬКИХ ІНТЕРМОДАЛЬНИХ ПЕРЕВЕЗЕНЬ В УМОВАХ НЕВИЗНАЧЕНОСТІ ІЗ ЗАСТОСУВАННЯМ НЕЙРОМЕРЕЖЕВОЇ ПРОГНОЗНОЇ МОДЕЛІ

6.1 Вплив нових транспортних технологій на розвиток туристичної індустрії в Україні

Доведення туристичної індустрії до сучасного рівня потребує підтримки у вигляді нових транспортних технологій. Ця теза актуальна не лише для країн із великою кількістю туристичних локацій, але передусім для таких країн, як Україна, Канада, США, де для їх досягнення потрібно долати великі відстані, використовуючи різні види транспорту. Проте транспорт може бути не тільки допоміжним засобом для туризму, але й відігравати головну роль у туристичній діяльності. Наприклад, англійський пастор Томас Кук, із якого починається історія сучасного туризму, вперше організував залізничну подорож із Ліверпуля до Лондона. Потім у 1843 році він організував прогулянкові рейси по Темзі. Майже одночасно на американському континенті легендарний колісний пароплав «Міссісіпі» компанії «American Express» відкрив регулярні тури по Міссісіпі. Подібні круїзи почали організовувати на Нілі, Рейні, Дунаї. У США та Канаді є багато водних туристичних маршрутів, таких як круїзи для спостереження за морськими ссавцями: китами, косатками або полярними ведмедями. Проте щоб дістатися до океанського узбережжя, необхідно використовувати інші види транспорту. Сфера водного туризму стрімко розвивається і в Україні. Так, кількість круїзів по Чорному морю та річці Дунай щороку зростає в порту Одеса. Але для того щоб дістатися до Одеси з таких великих міст, як Київ або Львів, необхідно подолати значні відстані. Тому, щоб ці маршрути не втратили своєї привабливості та для залучення нових клієнтів, необхідно впроваджувати нові транспортні технології.

За таких умов доцільно використовувати високошвидкісний залізничний транспорт як допоміжний вид транспорту, який є основним пасажирським транспортом в Україні. Такі поїздки є інтермодальними пасажирськими перевезеннями. Отже, нагальним завданням є формування сучасних технологій управління інтермодальними пасажирськими перевезеннями із залученням високошвидкісного залізничного транспорту.

6.2 Аналіз факторів попиту на залізничні пасажирські перевезення в контексті туризму

Системи високошвидкісної залізниці потребують ретельного технічного планування та ухвалення рішень про основні елементи і режими роботи, що мають складні зв'язки. Недостатнє врахування хоча б одного фактора може поставити під сумнів можливість існування такої системи.

Останнім часом у багатьох розвинених країнах наявність високошвидкісного залізничного транспорту стає додатковим поштовхом для подальшого розвитку туризму [148]. Наприклад, високошвидкісний залізничний транспорт бере участь у реалізації інтермодальних пасажирських перевезень для туристичних круїзів із використанням водного транспорту (рисунок 6.1).

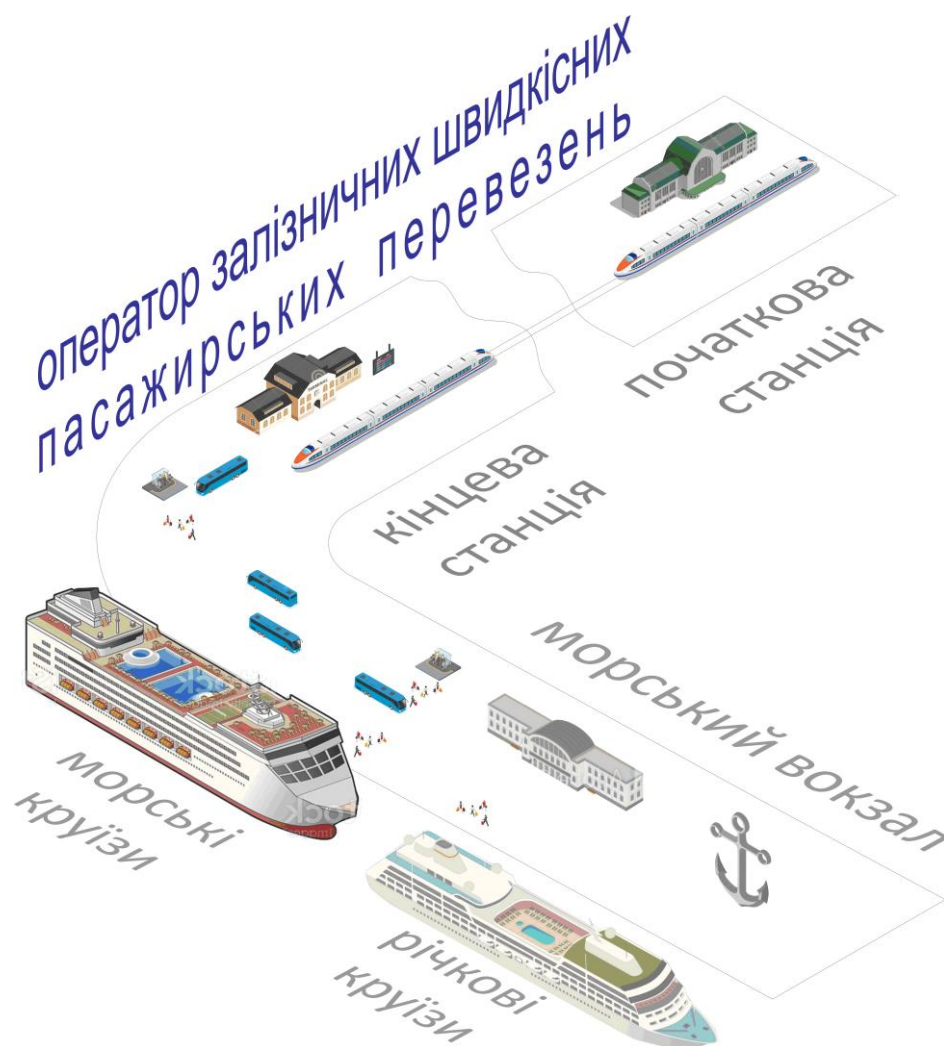


Рисунок 6.1 – Схема взаємодії між видами транспорту під час здійснення інтермодальних пасажирських перевезень із метою туризму

Для того щоб туристичний потік не зменшувався, необхідно зробити подорож привабливою для туристів. За результатами досліджень [149] було встановлено, які фактори впливають на привабливість туристичних поїздок із використанням високошвидкісного залізничного транспорту (рисунок 6.2).



Рисунок 6.2 – Значущість факторів, що впливають на ухвалення рішення про здійснення туристичних подорожей із використанням швидкісного залізничного транспорту

Оскільки високошвидкісні лінії вже існують, спершу визначаємо фактори, які безпосередньо впливають на рішення здійснити туристичну поїздку. Другим за важливістю фактором (28 %) є час доступу до залізничної станції, який залежить від щільності зупинок на лінії або наявності зручних автобусних маршрутів для під'їзду до залізничної станції. Найважливішим фактором (43 %) є загальна тривалість поїздки із використанням допоміжних видів транспорту для пересування до туристичної локації або зміни на туристичні види транспорту (водний транспорт).

Слід зазначити, що загальна тривалість поїздки включає час доступу до залізничної станції. Отже, щоб підвищити привабливість подорожей, необхідно розробити механізми впливу на ці два фактори: час доступу до залізничної станції та час руху високошвидкісного поїзда.

Час доступу пасажирів і відповідно загальний час подорожі пов'язані. Так само вони залежать від багатьох факторів, таких як площа покриття, тобто щільність станцій. Швидкість поїздів залежить від щільності зупинок на лінії. На привабливість подорожі також впливають частота і заповненість поїздів. Вони у свою чергу залежать від кількості робочого парку поїздів, пропускної спроможності лінії, тарифів та інших економічних факторів. Вивчення серйозності та складності такої взаємопов'язаної системи спонукає до ретельного опрацювання процедур

ухвалення рішень про планування, проектування та експлуатацію таких ліній, а також постійний комплексний моніторинг їхньої роботи.

Час подорожі до туристичної локації або туристичного виду транспорту складається з часу доступу (прибуття іншими видами транспорту) пасажирів до залізничної лінії, часу подорожі залізницею та часу пересадки між залізничним і водним транспортом. Час пересадки залежить насамперед від узгодженості розкладів цих видів транспорту і часу подолання відстані між терміналами. Однак насамперед необхідно виділити фактори, безпосередньо пов'язані із залізничним транспортом - час доступу пасажирів до залізничної лінії та час руху високошвидкісного поїзда. Для кількісного оцінювання привабливості поїздки можна використовувати функцію корисності. Лінійні функції корисності часто використовують як функцію корисності в таких завданнях [150].

На рисунку 6.3 загальна функція корисності подорожі для пасажирів подана як лінійна залежність (3). Залежність корисності від часу доступу до залізничної станції, яка залежить від кількості зупинок на лінії, у деяких дослідженнях подана як опукла функція (1). Тоді різниця між кривими (3) і (1) є ввігнутою кривою (2). Вона являє собою функцію корисності тривалості подорожі, яка залежить від швидкості, що у свою чергу залежить від кількості зупинок на лінії.

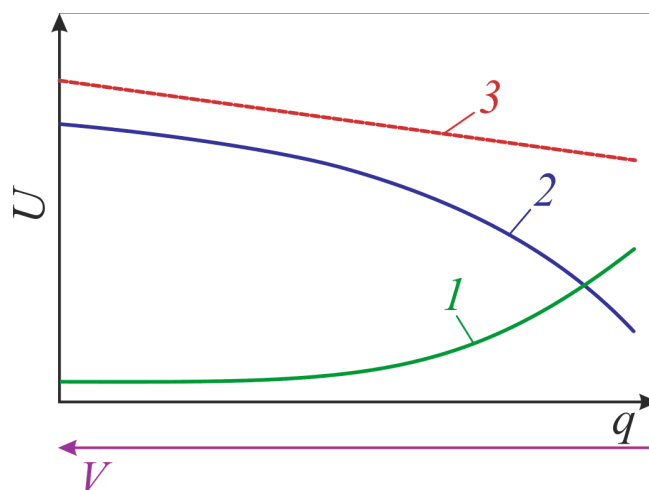


Рисунок 6.3 – Спрощені функції корисності ухвалення рішення про здійснення подорожі швидкісним залізничним транспортом: 1) залежно від доступності станцій; 2) залежно від швидкості поїзда; 3) загальна

Ця функція, очевидно, зменшується. Однак ми також стверджуємо, що ця ввігнута форма кривої є правильною, оскільки більша еластичність на початковому відрізку зменшення швидкості відповідає психології туристів, адже незначні зміни в тривалості поїздки мало впливають на ухвалення рішень. Для більш точного визначення функції корисності запропоновано побудувати її на основі п'ятипараметричної логістичної функції [151]. Такий підхід дасть змогу надати їй бажаної форми, ураховуючи важливість корисності та еластичності в певних точках її розрахункової області.

Збільшення швидкості поїздів на лінії шляхом технічної модернізації колій, автоматизації та рухомого складу часто є неможливим або економічно недоцільним. За таких умов раціональним способом досягнення цієї мети є формування методів організації руху високошвидкісних поїздів і розроблення на їхній основі відповідної технології управління.

6.3 Формування моделі корисності поїздки для пасажирів

Важливим критерієм вибору пасажиром транспортного засобу для здійснення подорожі, зокрема швидкісного пасажирського поїзда, звісно, є безпека [152], але залізничний транспорт має високу репутацію в плані безпеки для пасажирів, тому для пасажирів фактично нема різниці у виборі швидкісного чи звичайного залізничного сполучення відносно фактору безпеки.

В економічно розвинених країнах основна конкуренція відбувається між залізничним і авіаційним транспортом [153]. Цей факт додатково свідчить про те, що корисність для пасажирів залежить насамперед від швидкості і відстані перевезень. Чим більше відстань, тим менше корисність, у той же час чим вище швидкість, тим більше корисність. Однак чим більше відстань і швидкість, тим більше вартість квитка. Отже, вартість також залежить від відстані і швидкості. Функцію корисності доцільно сформувавши у вигляді моделі з використанням нечіткої логіки. Такий підхід дає змогу побудувати гнучку залежність, у тому числі із залученням експертів (наприклад у вигляді опитування пасажирів). Найбільш раціональна архітектура такої моделі – модель нечіткого виведення FIS типу Мамдані [154] (рисунок 6.4).

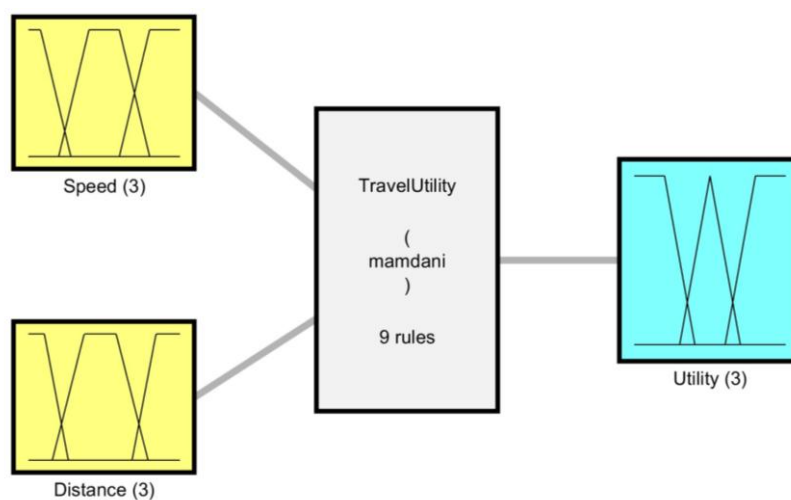


Рисунок 6.4 – Архітектура розробленої моделі визначення корисності поїздки, сформована на основі системи нечіткого виведення FIS

Створена модель оцінювання корисності поїздки для пасажирів на основі нечіткої логіки [155] дає змогу враховувати різні параметри, такі як швидкість поїзда та відстань поїздки. У цій моделі використано функції належності та правила (рисунок 6.5) для оцінювання корисності поїздки з урахуванням впливу зазначених факторів.

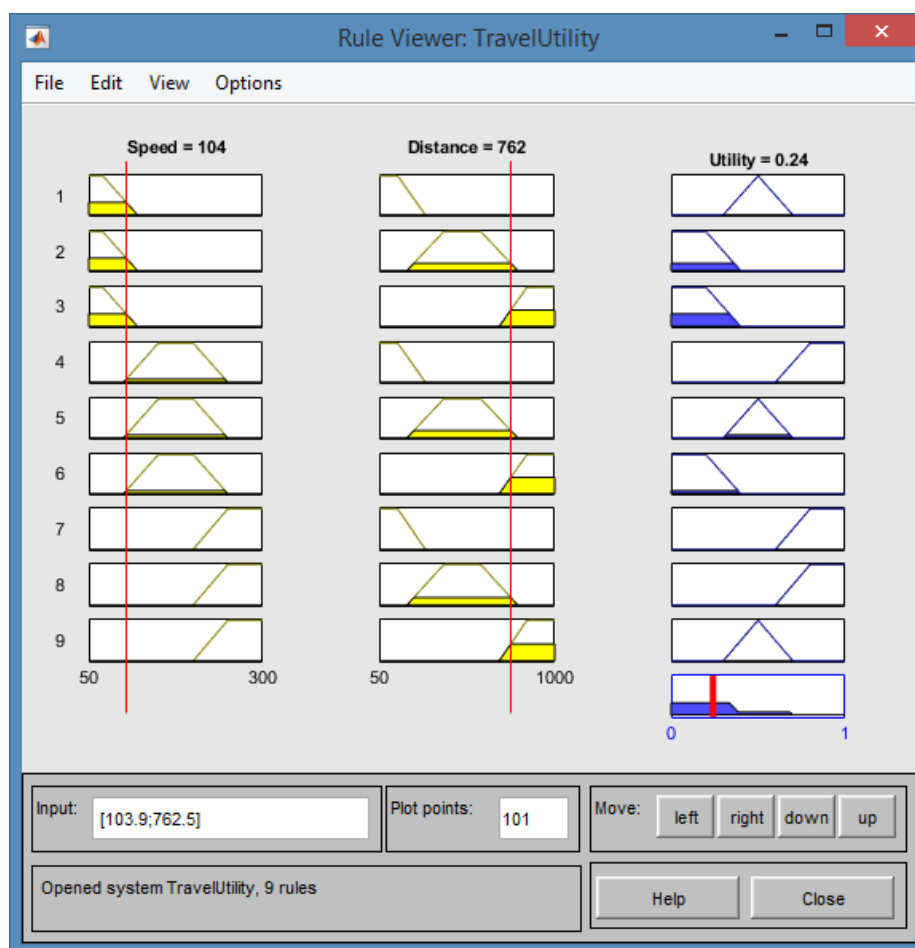


Рисунок 6.5 – Візуалізація процесу виведення за допомогою ядра розробленої системи FIS, яке являє собою базу нечітких правил

На рисунку 6.6 наведені дві вхідні нечіткі лінгвістичні змінні (швидкість і відстань) і одна вихідна (корисність), подані як терм множинами, які у свою чергу подані як функції належності.

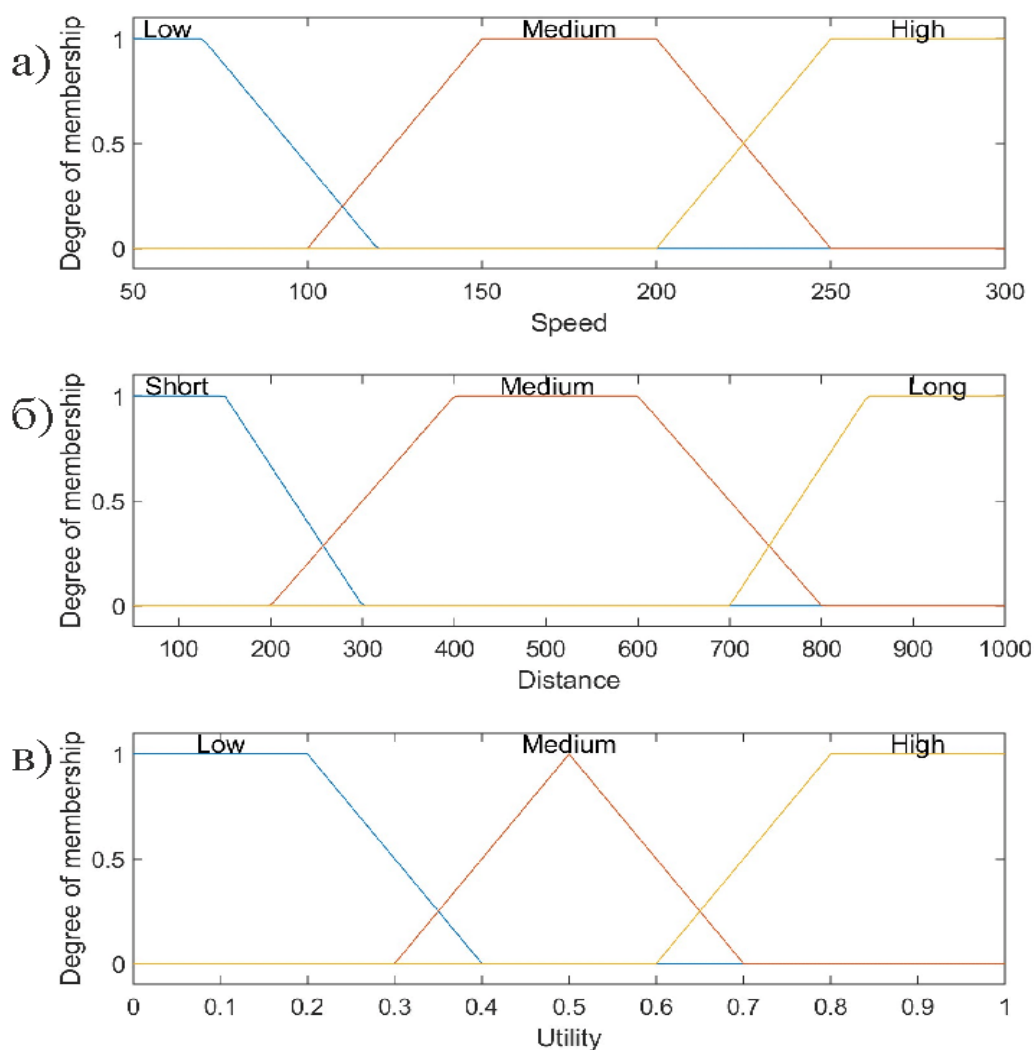


Рисунок 6.6 – Вхідні нечіткі лінгвістичні змінні: а) швидкість; б) відстань; в) вихідна змінна корисність, подані як терм множиною, які у свою чергу подані наборами як функції належності

Вхідні змінні включають швидкість поїзда та відстань поїздки, кожна з яких описана за допомогою трикутних і трапецієподібних функцій належності. Наприклад, швидкість поїзда поділена на категорії «низька», «середня» та «висока», а відстань поїздки – «коротка», «середня» та «довга».

Для опису вихідної змінної, яка зображує корисність поїздки, також використовують трапецієподібні функції належності, які поділяють корисність на «низьку», «середню» та «високу». Правила, що визначають залежності між вхідними та вихідними змінними, сформовані на основі логічних співвідношень. Наприклад, якщо швидкість поїзда низька, а відстань коротка, корисність буде

середньою; якщо швидкість середня і відстань довгі, корисність буде низькою і так далі.

Такий підхід дає змогу гнучко моделювати сприйняття корисності поїздки пасажирями, ураховуючи об'єктивні параметри (швидкість і відстань) і суб'єктивні аспекти, пов'язані зі сприйняттям комфорту і задоволенням від поїздки. Складність і нелінійність залежностей між параметрами роблять модель більш реалістичною та застосовною в умовах невизначеності та змінюваного попиту на високошвидкісні пасажирські перевезення.

У моделі нечіткої інференційної системи (англ. Fuzzy Inference System, FIS) [156], побудованій для оцінювання вартості квитка на високошвидкісний поїзд, функції належності відіграють головну роль у визначенні ступеня належності вхідних параметрів (швидкості поїзда і відстані поїздки) до відповідних нечітких множин. Вибір конкретних типів функцій належності обґрунтований бажанням точно моделювати реальні умови та забезпечити плавний перехід між різними ступенями належності.

Для швидкості поїзда ми використовували трапецієподібні функції належності. Цей вибір пояснено необхідністю чітко визначити нижню і верхню межі швидкостей, які є звичними для високошвидкісних поїздів, і одночасно забезпечити плавний перехід між низькою, середньою та високою швидкістю. Трапецієподібні функції належності дають змогу моделювати ці межі, водночас зберігаючи гнучкість у відображенні проміжних значень швидкості. Такий підхід забезпечує більш реалістичне відображення варіацій у швидкості поїзда, що є важливим для точного прогнозування вартості квитка.

Для відстані поїздки доцільно застосувати трикутні функції належності [157], оскільки вони забезпечують просту, але ефективну модель для визначення коротких, середніх і довгих відстаней. Трикутні функції належності мають лінійні границі, щоб легко інтерпретувати і реалізувати їх у моделі. Вибір цього типу функцій обумовлений потребою в простоті та ефективності для моделювання відстані, яка є важливим фактором у визначенні вартості квитка.

Загалом вибір трапецієподібних і трикутних функцій належності пояснюють необхідністю забезпечити точність, гнучкість і простоту моделювання. Трапецієподібні функції належності дають змогу моделювати складніші взаємозв'язки для швидкості поїзда, тоді як трикутні функції дають ефективний засіб для відображення відстані поїздки. Разом ці функції належності забезпечують надійну базу для побудови нечіткої інференційної системи, здатної точно моделювати залежність вартості квитка від швидкості поїзда і відстані поїздки, ураховуючи реальні умови та потреби пасажирів.

Залежність вартості квитка від швидкості поїзда і відстані поїздки є вбудованою в правила системи нечіткого виведення (FIS), що дає змогу моделі відображувати реалістичні умови пасажирських перевезень. У правилах нечіткої логіки враховують швидкість поїзда і відстань поїздки, щоб динамічно змінювати вартість квитка залежно від цих параметрів.

Швидкість поїзда і відстань поїздки впливають на кінцеву вартість квитка через нечіткі правила, які встановлюють зв'язок між цими змінними. Наприклад, одне з правил може стверджувати, що якщо швидкість поїзда висока і відстань поїздки довга, то вартість квитка буде значно вищою. Інше правило може вказувати, що якщо швидкість поїзда низька і відстань поїздки коротка, то вартість квитка буде відносно низькою.

Ці правила дають змогу моделі адаптувати вартість квитка залежно від поєднання різних факторів, забезпечуючи тим самим більш точну та реалістичну оцінку корисності поїздки для пасажирів. Використання нечіткої логіки в цьому контексті дає можливість моделювати складні та нелінійні зв'язки, що робить модель більш адаптивною до реальних умов і потреб пасажирів.

Отже, залежність вартості квитка від швидкості поїзда і відстані поїздки врахована в моделі через систему нечітких правил, щоб точно та гнучко відображувати вплив цих факторів на загальну корисність поїздки для пасажирів.

Фактично функцію корисності [158] можна інтерпретувати як імовірність або впевненість. Частка пасажирів, які виявлять бажання скористатися високошвидкісним поїздом за певних умов, буде пропорційною значенню цієї

функції. У такому контексті функція корисності $U(V,d)$ буде відображувати не лише суб'єктивну вигоду від подорожі, а і впевненість або ймовірність вибору такого виду транспорту пасажирями. Отже, вона може бути використана для оцінювання частки потенційних пасажирів, які виберуть швидкісний залізничний транспорт для поїздки, і відповідно кінцевого визначення обсягу пасажиропотоку на основі попереднього прогнозу, який, наприклад, визначає потенційну чисельність пасажирів.

Така інтерпретація функції корисності як імовірності або впевненості цілком логічна, оскільки пасажирі, вибираючи транспортний засіб, фактично оцінюють його корисність (зручність, швидкість, вартість) і ухвалюють рішення на основі цієї оцінки. Якщо корисність висока, то ймовірність вибору цього транспорту також буде високою.

Однак функція корисності, отримана у вигляді поверхні відгуку моделі нечіткого виведення, відображує лише відносну перевагу однієї альтернативи над іншою і не забезпечує коректного перетворення цих значень у ступінь впевненості, яка б задовольняла основні вимоги ймовірнісного підходу. Основна проблема полягає в тому, що значення функції корисності залежно від її параметрів можуть виходити за межі інтервалу від 0 до 1 або не мати інтуїтивно зрозумілої інтерпретації як рівня впевненості. Ба більше, функція корисності за своєю природою нелінійна та може мати значення, які непрямо співвідносяться з фактичними ймовірностями вибору. Тому без відповідного перетворення, наприклад за допомогою логістичної функції, її використання як функції впевненості може призвести до некоректних або неадекватних результатів. Саме з метою адаптації отриманих значень до ймовірнісної інтерпретації застосовують логіт-модель для коректного перетворення значення функції корисності у функцію впевненості, що відповідає усім вимогам до такого роду моделей.

Отже, логіт-модель вибрана для такої задачі, оскільки вона є ефективним інструментом для моделювання функції впевненості у випадках, де існує необхідність визначити ймовірність вибору між двома альтернативами. У задачі функція впевненості залежить від швидкості руху поїзда та відстані, а оцінено цю

залежність через логістичну функцію. Основна перевага логіт-моделі полягає в тому, що вона дає змогу інтегрувати функцію корисності, отриману у вигляді поверхні відгуку моделі нечіткого виведення, без необхідності фіксації явних коефіцієнтів при параметрах. Це забезпечує збереження інформації про залежності між факторами без зайвого спрощення моделі. Застосування логістичної функції гарантує, що значення функції впевненості залишатимуться в межах від 0 до 1, що відповідає вимогам до інтерпретації результатів як ступеня впевненості у виборі тієї чи іншої альтернативи. Крім того, логіт-модель теоретично обґрунтована, оскільки базована на припущенні про розподіл похибок у вигляді розподілу Гумбеля, що дає змогу уникнути суперечностей з розробленням моделі. Її широке застосування в транспортних дослідженнях підтверджує практичну ефективність і адаптивність до різних задач. Завдяки цьому логіт-модель є оптимальним інструментом для вирішення задачі оцінювання впевненості у виборі, забезпечуючи надійність і точність отриманих результатів.

Отже, впевненість у тому, що потенційний пасажир здійснить свій вибір на користь певного виду транспорту в контексті застосування логіт-моделі розраховують за формулою

$$P(V, d) = \frac{e^{U(V, d)}}{1 + e^{U(V, d)}}, \quad (6.1)$$

де $U(V, d)$ – функція корисності.

Тут у знаменнику присутня сума двох варіантів вибору: корисності поїздки та відмови від неї (корисність якої доцільно прийняти за 0). Тобто це означає, що потенційний пасажир не отримає додаткової вигоди від того, що відмовиться від поїздки, і в експоненційному вигляді корисність відмови в такому випадку і подана як одиниця.

На рисунку 6.7 наведена функція впевненості, побудована на основі функції корисності, отриманої у вигляді поверхні відгуку сформованої моделі нечіткого виведення, і логіт-моделі.

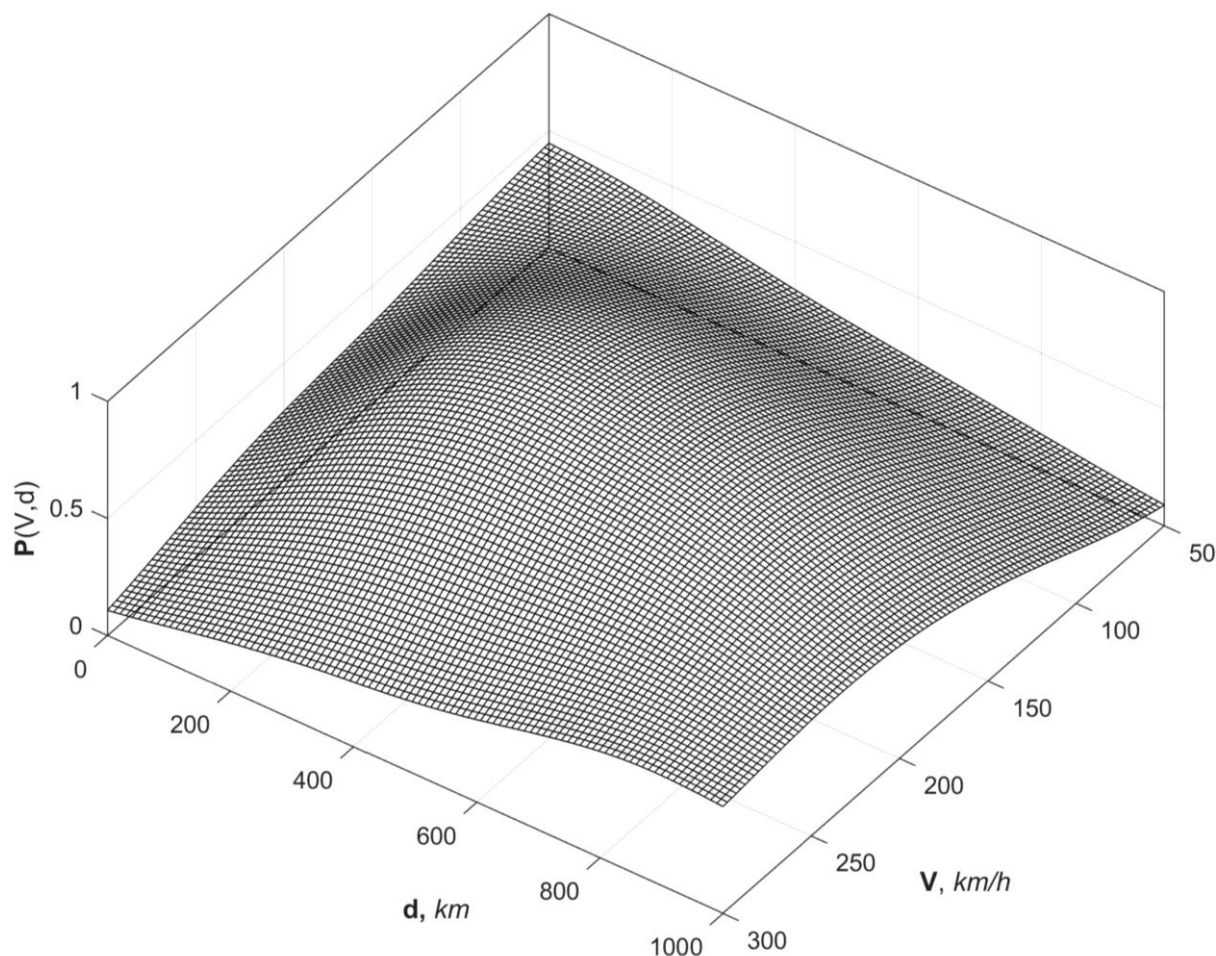


Рисунок 6.7 – Функція впевненості в тому, що потенційний пасажир вибере поїздку на швидкісному поїзді

Отже, використання логіт-моделі дало змогу трансформувати функцію корисності у функцію впевненості, яка задовольняє обмеження теорії імовірності і може бути коректно використана для оцінювання частки потенційних пасажирів, які зроблять вибір на користь здійснення поїздки на швидкісному поїзді.

6.4 Формування моделі розрахунку схеми курсування швидкісних поїздів на напрямку в умовах туристичних пасажиропотоків

Високошвидкісні залізничні перевезення стають дедалі популярнішими в багатьох країнах світу, пропонуючи швидкість, комфорт і екологічність. Однак планування таких перевезень стикається з численними викликами, серед яких одним із найважливіших є невизначеність у прогнозуванні попиту на пасажирські перевезення. Попит на пасажирські перевезення може суттєво змінюватися залежно від пори року. Наприклад, влітку та під час святкових періодів кількість пасажирів зазвичай збільшується, тоді як у міжсезоння зменшується. Рівень доходів населення, економічна стабільність і купівельна спроможність безпосередньо впливають на попит на високошвидкісні перевезення. Під час економічних криз люди можуть відмовлятися від подорожей або вибирати дешевші альтернативи. Наявність альтернативних видів транспорту, таких як авіаперельоти або автомобільні перевезення, може впливати на попит. Зміни в тарифах або якості обслуговування конкурентів можуть спричинити непередбачувані коливання в кількості пасажирів. Політична стабільність, безпека та соціальні події (наприклад великі спортивні або культурні заходи) можуть значно впливати на попит на пасажирські перевезення.

У будь-якому разі головне, що має виконувати система управління швидкісними пасажирськими перевезеннями, – це формувати схему маршрутів так, щоб максимізувати кількість пар пунктів відправлення-призначення, які мають найбільший попит [159].

Для зменшення невизначеності у плануванні пасажирських високошвидкісних перевезень доцільно використовувати сучасні методи і технології. Використання сучасних технологій аналізу великих даних дає змогу більш точно прогнозувати попит, ураховуючи численні фактори та їхні зв'язки. НМ та інші методи машинного навчання можуть бути ефективно використані для прогнозування попиту на основі історичних даних і виявлення прихованих тенденцій. Розроблення різних сценаріїв розвитку подій дає змогу підготуватися до різних варіантів розвитку ситуації та

зменшити ризики невизначеності. Запровадження гнучких схем розкладу та можливості оперативного реагування на зміни попиту зменшують негативні наслідки від непередбачуваних змін.

Невизначеність у плануванні попиту на пасажирські високошвидкісні перевезення є складним викликом, але завдяки використанню сучасних технологій і підходів можна значно зменшити її вплив. Застосування аналізу великих даних, моделей машинного навчання та гнучких стратегій планування дасть змогу забезпечити стабільну роботу високошвидкісних залізничних систем і задовольнити потреби пасажирів. Такі моделі слід інтегрувати до системи АСК ПП УЗ Є.

Однією з таких гнучких стратегій для зменшення часу руху пасажирських поїздів є метод «пропущених зупинок» (англ. skip stop method) [160-165].

Ідея методу полягає в тому, що експрес-поїзди кількох типів рухаються по лінії, і під час зупинок кожен поїзд відвідує лише певну підмножину станцій. Пропускання кількох станцій зменшує цикл руху та збільшує маршрутну швидкість. Однак таку технологію застосовують фактично майже завжди лише на міському рейковому транспорті.

Технологія пропущених зупинок підвищує маршрутну швидкість на лінії та зменшує частоту зупинок порівняно зі стандартною схемою організації, проте при цьому вона може ускладнити процес планування. Крім того, ця технологія може призвести до відсутності прямого сполучення між деякими станціями на маршруті, але за рахунок збільшення швидкості пропускна спроможність лінії підвищується. Однак для максимізації пасажиропотоку необхідно орієнтуватися на корисність для пасажирів.

Для більшості пасажирів нема великої різниці, чи належить поїзд до категорії InterCity+, InterCity [166] або звичайних міжрегіональних поїздів. Хоча цих пасажирів можна перевозити іншими категоріями поїздів, все ж таки необхідно мінімізувати втрату пасажиропотоку для компаній, що обслуговують високошвидкісні залізничні перевезення, і максимізувати прибуток шляхом залучення нових пасажирів. Отже, цільову функцію моделі, яка являє собою прибуток залізничного оператора, можна записати так:

$$C(X, \gamma) = \sum_{i=1}^k \sum_{a=1}^{\#S} \sum_{b=a+1}^{\#S} P(V(X_{i,:}, a, b), d(a, b)) \cdot c(X, a, b) \gamma_{i,a,b} q_{a,b} \left(I_{\{s_m | X_{i,m}=1\}}(s_a) \cdot I_{\{s_m | X_{i,m}=1\}}(s_b) \right) \rightarrow \max, \quad (6.2)$$

де X – змінна матриця, що містить булеві значення, що відповідають включенню зупинок на станціях маршруту всіх поїздів на лінії, кількість рядків k цієї матриці дорівнює кількості швидкісних поїздів, які доповнюють один одного за системою skip-stop, і також може змінюватися, кількість стовпців матриці не змінюється і дорівнює потужності множини всіх станцій S на напрямку, на яких можливі зупинки пасажирських поїздів, що записано як $\#S$;

$I_{\{s_m | X_{i,m}=1\}}(s_a)$ – індикаторна функція, яка повертає значення 1 у разі належності елемента s_a до підмножини $\{s_m | X_{i,m}=1\}$, сформованої з впорядкованої множини S елементів станцій на напрямку, номери яких співпадають із номерами елементів i -го рядка матриці X , значення яких дорівнюють 1;

$d(a, b)$ – функція, що повертає відстань між станціями з порядковими номерами a і b ;

$V(X_{i,:}, a, b)$ – функція, що повертає значення величини середньої швидкості i -го поїзда між станціями з порядковими номерами a і b залежно від поточного стану елементів i -го рядка $X_{i,:}$, тобто від того, які зупинки i -го поїзда пропущені в поточній версії плану;

$c(X, a, b)$ – функція, що повертає вартість проїзду між станціями з порядковими номерами a і b залежно від поточного стану елементів матриці X , тобто від кількості поїздів, а також максимальної теоретичної величини охопленого пасажиропотоку, що відповідає поточному стану елементів матриці, тобто схемі зупинок за технологією skip-stop, оскільки вартість квитка залежить від собівартості перевезень, а також величини очікуваного прибутку;

$\gamma_{i,a,b}$ – елемент змінного тензора (тривимірної матриці) γ , що містить значення частки пасажиропотоку між станціями з порядковими номерами a і b , які перевозять i -м поїздом;

$q_{a,b}$ – розрахунковий або прогнозний пасажиропотік між станціями з порядковими номерами a і b ;

$P(V(X_{i,:}, a, b), d(a, b))$ – функція, що повертає кількісну оцінку впевненості в тому, що потенційний пасажир вибере поїзду між станціями з порядковими номерами a і b на i -му швидкісному поїзді залежно від поточної (що відповідає поточній версії плану) середньої швидкості на цій ділянці шляху та відстані (а також відповідної вартості квитка), тобто ця функція імовірності фактично є нормованою функцією корисності, інтерпретованою як імовірність.

Ця цільова функція є критерієм, що виражає дохід компанії-оператора швидкісних залізничних перевезень від продажу квитків в умовах обслуговування пасажиропотоку, у тому числі туристичного. Отже, ця цільова функція підлягає максимізації. Однак для забезпечення знаходження адекватних рішень і рішень, що відповідають технологічним умовам, на змінні моделі необхідно накласти відповідні обмеження:

$$\left\{ \begin{array}{l} I_{X_i}(s_1) = 1, \quad i = 1 \dots k \\ I_{X_i}(s_{\#S}) = 1, \quad i = 1 \dots k \\ \sum_{i=1}^k \gamma_{i,a,a+1} \leq 1, \quad a = 1 \dots \#S - 1 \\ \sum_{g=1}^a \sum_{h=a+1}^{\#S} \gamma_{i,g,h} q_{g,h} \leq \psi_i^{\max}, \quad a = 1 \dots \#S - 1, \quad \forall i = 1 \dots k \end{array} \right., \quad (6.3)$$

де $\psi_i^{\max}$ – пасажиромісткість, тобто максимально можлива населеність i -го поїзда.

Перші два обмеження забезпечують включення першої і останньої станцій лінії до маршруту кожного швидкісного поїзда, це необхідне перш за все для того, щоб забезпечити можливість транспортування туристичного пасажиропотоку по всьому шляху від початкової станції (у великому місті) до кінцевої станції (пункті трансферу до туристичного виду транспорту). Третє обмеження забезпечує

неперевищення суми часток добових пасажиропотоків між певними станціями, що перевозять у всіх швидкісних поїздах, загальних величин добових кореспонденцій пасажиропотоків між відповідними станціями.

Сформовану модель можна класифікувати як модель змішаного програмування [167]. Оптимізація математичних моделей змішаного програмування стикається з кількома труднощами. По-перше, змішане програмування поєднує безперервні і дискретні змінні, що ускладнює пошук оптимального рішення. Це призводить до необхідності використання спеціалізованих алгоритмів, які можуть бути обчислювально витратними.

По-друге, багато задач змішаного програмування мають комбінаторну природу, що може призводити до експоненційного зростання кількості можливих рішень з ускладненням моделі. Це робить їх важкими для розв'язання навіть за допомогою сучасних обчислювальних засобів.

Крім того, змішане програмування часто стикається з проблемами локальних оптимумів, де алгоритм може застрягти в неоптимальному рішенні. Це потребує впровадження додаткових стратегій, таких як стохастичні методи або методи глобальної оптимізації.

Останньою складністю є необхідність точного визначення та формулювання обмежень, які можуть бути складними для практичного застосування через невизначеність або неповноту даних. Усе це ускладнює процес моделювання та оптимізації в змішаному програмуванні [168].

6.5 Формування моделі прогнозування пасажиропотоків

Методи прогнозування пасажиропотоків постійно удосконалюють і розробляють нові [169]. Однак складність прогнозування попиту на високошвидкісні пасажирські перевезення є особливо відчутною в умовах, коли на лінії присутні як туристичні пасажирів, які подорожують до кінцевої станції і

пересідають на інтермодальний водний транспорт, так і звичайні пасажери, які виходять на проміжних станціях. Така ситуація ускладнює прогнозування і потребує використання складних прогностичних моделей, зокрема НМ.

Складність також і в тому, що прогнозувати потрібно всі дані одночасно по всіх станціях напрямку, адже між ними існує певний зв'язок.

Початкові дані для вирішення завдання прогнозування складаються з історичних даних про пасажиропотік між станціями на високошвидкісній залізничній лінії. У будь-якому разі прогнозна модель має бути забезпечена якісними вихідними даними. Якісний збір і первинну обробку історичних даних доцільно організувати на базі окремої підсистеми системи стратегічного планування пасажирських перевезень [170]. Такі дані доцільно подавати у вигляді часових рядів.

НМ, засновані на сучасних математичних методах, є потужним інструментом для вирішення завдань прогнозування часових рядів. Однак побудова та ефективне застосування нейромережових моделей при вирішенні подібних задач прогнозування є значно ускладненим через багатовимірний характер історичних даних про пасажиропотік. Теоретично кожне вимірювання може бути прогнозовано окремо, але цей підхід потребує створення та навчання численних індивідуальних моделей, які відповідають кожному вимірюванню багатовимірного часового ряду, що налаштовані окремо. Основний недолік такого підходу полягає в тому, що в ньому неможливо врахувати зв'язок між даними паралельних рядів.

Прогнозування багатовимірних часових рядів є складною проблемою, із якою стандартні архітектури НМ мають труднощі. Класичні регресійні моделі, такі як векторна авторегресійна модель (англ. vector autoregressive moving average models, VARMA) [171], також мають обмеження у прогнозуванні даних через сезонні фактори та інші труднощі. Вирішення таких завдань залежить від передових розробок у галузі штучного інтелекту.

У 2014 році розроблена модель генеративно-змагальної мережі (GAN) [172] як інноваційний алгоритм навчання без учителя, що складається з двох конкуруючих НМ: генератора та дискримінатора.

Генеративні змагальні мережі (англ. Generative Adversarial Networks, GAN) – це один із найбільш інноваційних і впливових напрямів у галузі штучного інтелекту і машинного навчання. Ця архітектура НМ, запропонована Яном Гудфеллоу у 2014 році, дає можливість створювати нові дані, дуже схожі на реальні. GAN використовують у різних сферах – від генерації зображень та відео до створення музики і текстів.

Основна ідея GAN полягає у взаємодії двох НМ: генератора та дискримінатора. Генератор відповідає за створення нових даних, починаючи з випадкового шуму, дискримінатор має завдання відрізнити реальні дані від згенерованих. Генератор намагається обманути дискримінатор, створюючи все більш реалістичні дані, водночас дискримінатор вдосконалюється в розпізнаванні підробок. Цей процес можна уявити як змагання між двома гравцями: один намагається фальшувати, а інший – виявляти фальсифікацію.

Архітектура GAN має багато цікавих особливостей [173]. По-перше, вони можуть генерувати дуже реалістичні зображення, які важко відрізнити від справжніх. Це робить їх надзвичайно корисними, наприклад, для завдань створення віртуальних персонажів у відеоіграх або фільмах, відновлення зображень або навіть створення нових художніх творів. По-друге, GAN можуть бути використані для покращення наявних даних, наприклад підвищення роздільної здатності зображень або видалення шуму.

Проте, незважаючи на свої переваги, GAN мають і певні недоліки. Один із головних – стабільність тренування. Оскільки генератор і дискримінатор навчаються одночасно, існує ризик, що одна з мереж може переважити іншу, що призведе до погіршення результатів. Для вирішення цієї проблеми розроблено багато технік, таких як налаштування гіперпараметрів, використання різних архітектур мереж і застосування методів регуляризації.

GAN також мають велике значення для наукових досліджень і розробок. Вони можуть бути використані для моделювання складних розподілів даних, що відкриває нові можливості в таких галузях, як медицина, генетика та екологія. Наприклад,

GAN можуть бути використані для синтезу медичних зображень, що допомагає у тренуванні діагностичних систем, або моделювання кліматичних змін.

Генеративні змагальні мережі – це потужний інструмент, який відкриває нові горизонти у створенні та моделюванні даних. Незважаючи на певні виклики, їхній потенціал для інновацій і наукових досліджень є величезним. Завдяки постійному розвитку методів і технологій GAN продовжують залишатися на передовій лінії досліджень у галузі штучного інтелекту.

Отже, початково розроблена переважно для обробки візуальних даних, таких як зображення, мережа GAN може також бути адаптована для обробки багатовимірних часових рядів. У цьому контексті кожен елементарний (одновимірний) часовий ряд відповідає лініям пікселів, а послідовні моменти часу – колонкам пікселів. Числові значення елементів часових рядів відображують інтенсивність пікселів (відтінки сірого).

Мережа генератора (G) генерує синтетичні зображення за допомогою матриць випадкового шуму, а мережа дискримінатора (D) оцінює ці згенеровані зображення поруч із реальними зображеннями, отриманими на основі історичних часових рядів пасажиропотоку.

Метою дискримінатора є максимізація ймовірності правильного розпізнавання реальних і згенерованих зразків. Функція втрат для дискримінатора виглядає так:

$$\max_D V(D, G) = E_{x \sim p_{data}(x)} [\ln D(x)] + E_{z \sim p_z(z)} [\ln (1 - D(G(z)))], \quad (6.4)$$

де x – реальні дані;

z – випадковий шум, використовуваний генератором для створення даних;

$p_{data}(x)$ – розподіл реальних даних;

$p_z(z)$ – розподіл випадкового шуму;

$E(\dots)$ – математичне сподівання випадкової величини;

$x \sim p_{data}(x)$ – означає, що випадкову величину x вибирають із розподілу реальних даних $p_{data}(x)$;

$z \sim p_z(z)$ – означає, що випадкову величину z вибирають із розподілу випадкового шуму $p_z(z)$;

$E_{x \sim p_{data}(x)}[\ln D(x)]$ – математичне сподівання логарифма виходу дискримінатора D , коли на вхід подано реальні дані x , взяті з розподілу реальних даних;

$E_{z \sim p_z(z)}[\ln(1 - D(G(z)))]$ – математичне сподівання логарифма виходу дискримінатора D , коли на вхід подано згенеровані дані $G(z)$, де z взяті з розподілу випадкового шуму $p_z(z)$.

Генератор намагається обдурити дискримінатор, змушуючи його вважати, що згенеровані дані є реальними. Функція втрат для генератора виглядає так:

$$\min_G V(D, G) = E_{z \sim p_z(z)}[\ln(1 - D(G(z)))] . \quad (6.5)$$

$V(D, G)$ у контексті генеративно-змагальних мереж – це функція вартості або функція втрат (англ. loss function) [174], використовувана для одночасного навчання двох моделей: дискримінатора D і генератора G . Ця функція відображує баланс між генератором, який намагається створити реалістичні зразки, і дискримінатором, який намагається відрізнити реальні зразки від фейкових.

Іноді також цю функцію називають функцією гри або цільовою функцією, яку використовують для навчання генератора G і дискримінатора D [175]. Ця функція описує взаємодію між генератором і дискримінатором у формі гри з нульовою сумою.

Генератор навчається створювати зображення, достатньо переконливі, щоб дискримінатор вважав їх реальними, а дискримінатор – розрізняти згенеровані і реальні зображення.

За допомогою паралельного навчання обох мереж генератор набуває здатності генерувати зображення, які дискримінатор сприймає як відповідні реальним. Ці

згенеровані зображення інтерпретовані як прогнози багатовимірних часових рядів, що допомагає в прогнозуванні майбутніх пасажиропотоків за різних умов.

Генеративно-змагальні мережі складаються з двох основних компонентів: генератора та дискримінатора, які працюють у взаємодії, змагаючись один з одним. Генератор намагається створювати нові зразки даних, які є якомога близькими до реальних даних, тоді як дискримінатор намагається відрізнити справжні дані від згенерованих. Цей підхід дозволяє GAN навчатися складним розподілам даних, що робить їх ідеальними для прогнозування багатовимірних часових рядів.

Зокрема, доцільно використовувати GAN для моделювання та прогнозування багатовимірних часових рядів, де кожен компонент ряду може мати різні патерни та залежності. Наприклад, у випадку прогнозування пасажирських перевезень на залізниці, де є туристичні пасажирів і регулярні пасажирів, важливо враховувати взаємодію між різними типами пасажирів і зміни в їхніх поведінкових патернах.

Використання генеративно-змагальних мереж GAN для прогнозування багатовимірних часових рядів є інноваційним підходом, який має значний потенціал для вдосконалення точності прогнозування в умовах високої невизначеності та складних нелінійних залежностей. Традиційні методи прогнозування, такі як авторегресійні моделі, методи ковзного середнього та методи на основі регресії, часто мають обмеження у випадках, коли дані містять складні взаємозв'язки та мультиколінеарність. У таких випадках застосування моделей на основі мереж GAN може забезпечити значно кращі результати. Запропонована архітектура прогнозової моделі на основі мережі GAN наведена на рис. 6.8.

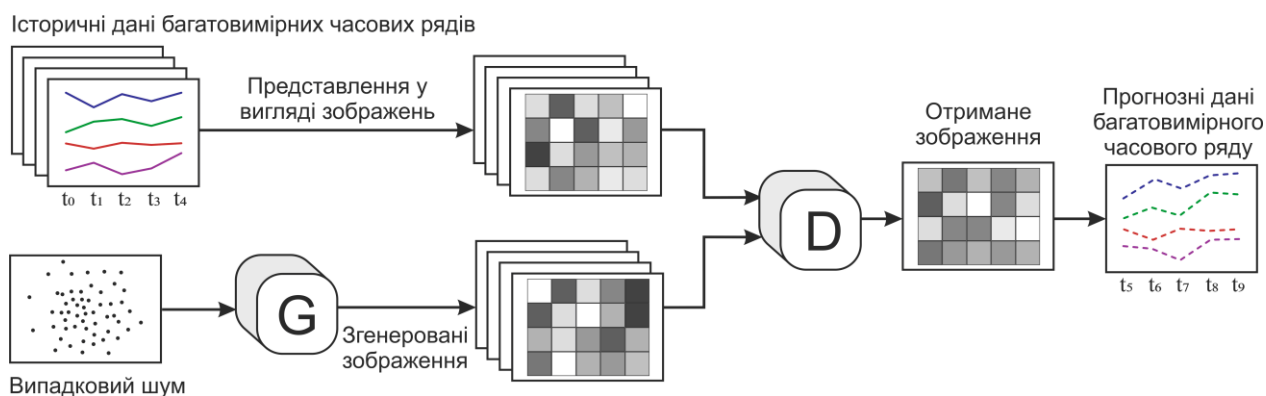


Рисунок 6.8 – Архітектура розробленої моделі для прогнозування багатовимірних часових рядів на основі HM GAN

Пропонована модель прогнозування на основі генеративно-змагальної мережі реалізована в середовищі Matlab. Симуляція відбувалася на реальних даних про пасажиропотоки між станціями Київ-Пасажирський і Одеса-Головна. На рисунку 6.9 показана динаміка оцінювання якості мереж генератора і дискримінатора в процесі навчання. Графік показує успішне налаштування об'єктів: дискримінатор ефективно управляє процесом навчання, уникаючи крайніх значень (0 або 1) в оцінках. Поступове зниження амплітуди коливань також вказує на стабілізацію обох мереж.

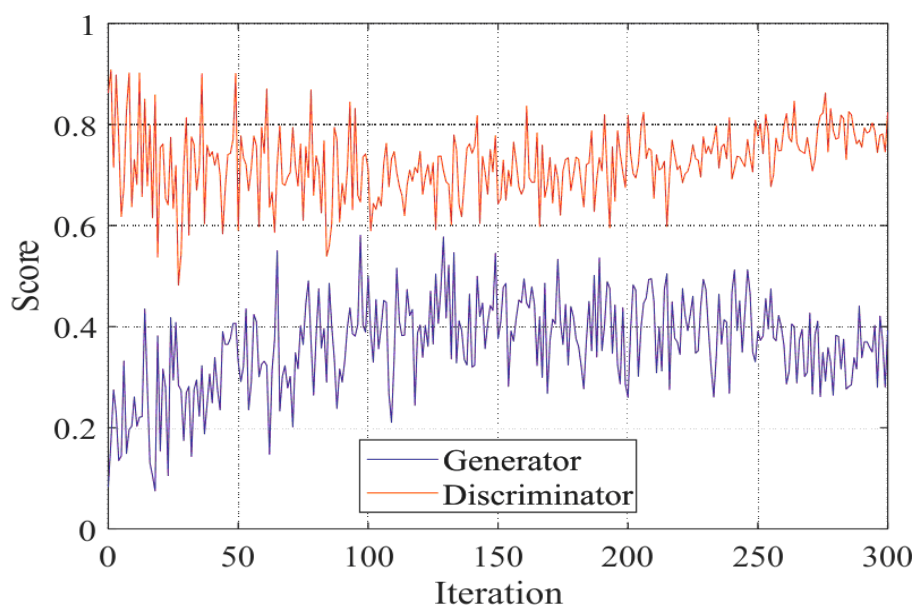


Рисунок 6.9 – Динаміка оцінювання якості роботи генераторної та дискримінаційної мереж у процесі навчання прогнозної моделі

У таблиці 6.1 показані фактичні дані про пасажиропотоки між станціями, прогнозні дані, отримані за допомогою сформованої моделі на 24 квітня, а також фактичні дані за попередній тиждень.

Таблиця 6.1 - Фактичні та прогнозні дані пасажиропотоків між станціями

№ з/п	Станція посадки	Станція висадки	17.04	18.04	19.04	20.04	21.04	22.04	23.04	24.04		
			факт							факт	прогноз	різн.
1	Київ-Пас.	Вінниця	26	43	44	46	47	47	44	29	33	4
2	Київ-Пас.	Жмеринка	17	29	28	21	20	10	30	18	18	0
3	Київ-Пас.	Вапнярка	22	32	24	36	24	13	31	20	17	-3
4	Київ-Пас.	Подільськ	21	33	36	36	39	43	44	20	20	0
5	Київ-Пас.	Одеса	375	703	698	693	757	672	713	407	402	-5
6	Вінниця	Жмеринка	29	49	40	45	47	36	44	25	27	2
7	Вінниця	Вапнярка	27	56	34	47	60	43	59	28	24	-4
8	Вінниця	Подільськ	11	6	16	13	15	24	21	10	11	1
9	Вінниця	Одеса	294	361	375	329	372	462	368	246	241	-5
10	Жмеринка	Вапнярка	20	45	42	46	46	27	48	32	32	0
11	Жмеринка	Подільськ	22	18	27	27	36	35	23	22	22	0
12	Жмеринка	Одеса	68	176	121	97	191	142	145	94	91	-3
13	Вапнярка	Подільськ	15	33	39	39	28	28	32	16	19	3
14	Вапнярка	Одеса	96	166	174	177	179	171	170	97	100	3
15	Подільськ	Одеса	87	142	140	139	162	144	149	84	84	0

Середня абсолютна відсоткова похибка, використовувана для оцінювання якості прогнозу часових рядів, становить $MARE = 5,9583 \%$. Ця точність прогнозу достатня для розроблення схеми маршрутів високошвидкісних пасажирських поїздів.

6.6 Оптимізація моделі

Як початкові дані для оптимізації сформованої моделі вибрано абстрактну лінію з 15 станціями. Середня відстань між станціями становить 40 км. Середні значення часів зупинки, прискорення та гальмування складають 1 хв, 6 хв і 7 хв відповідно. Швидкість руху поїзда складає 160 км/год. У таблиці 6.2 показані дані про пасажиропотоки між станціями на цій лінії.

Таблиця 6.2 - Кореспонденція пасажиропотоків між станціями на лінії

до ст. зі. ст.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
1	—	20	16	13	11	12	9	3	5	2	4	11	2	13	489
2	—	—	23	11	5	15	3	4	3	1	5	5	5	12	21
3	—	—	—	12	16	12	1	12	5	5	5	6	5	5	24
4	—	—	—	—	5	7	18	7	8	6	8	2	1	1	12
5	—	—	—	—	—	12	9	18	5	2	3	1	5	3	12
6	—	—	—	—	—	—	2	11	15	11	5	5	16	5	20
7	—	—	—	—	—	—	—	12	11	5	11	18	5	8	13
8	—	—	—	—	—	—	—	—	11	12	14	5	11	11	11
9	—	—	—	—	—	—	—	—	—	17	5	18	5	14	13
10	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	18	23	12	6	11
11	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	2	4	2	18
12	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	5	1	17
13	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	12	19
14	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	20
15	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—

Оскільки цільова функція і система обмежень являють собою модель змішаного цілочисельного програмування, ця проблема належить до задач комбінаторної оптимізації, і тому для її вирішення потрібен пошук великої кількості варіантів векторів, що управляють змінними. Вектор змінних має містити інформацію про наявність зупинки на всіх 13 проміжних станціях маршруту (на початковій і кінцевій станціях зупинки завжди є). Тоді для планування маршрутів лише двох поїздів одночасно кількість можливих варіантів плану руху поїздів

$$N = 2^{k \cdot (\#S - 2)} = 2^{2 \cdot (15 - 2)} = 2^{26} = 67108864. \quad (6.6)$$

Оскільки для задач комбінаторної оптимізації великого розміру практично не існує загальних ефективних точних методів розв'язання, доцільно застосовувати сучасні наближені метаевристичні методи, до яких належить, наприклад, метод ГА - метод стохастичного пошуку, ефективність якого зумовлена відтворенням механізмів розвитку адаптації та передавання спадковості живої природи, таких як відбір, схрещування і мутація. Для використання ГА рішення має бути подано у вигляді хромосоми. У цьому випадку хромосома містить гени з булевими змінними, що несуть інформацію про наявність чи відсутність зупинок на станціях маршруту

кожного з поїздів.

Для оптимізації моделі було використано ГА з плаваючою точкою (англ. floating point genetic algorithm, FPGa) [176] із накладенням цілочисельних обмежень на деякі змінні. На рисунку 6.10 показана динаміка збіжності цільової функції під час виконання ГА за допомогою програмного забезпечення, реалізованого мовами Matlab та C#.

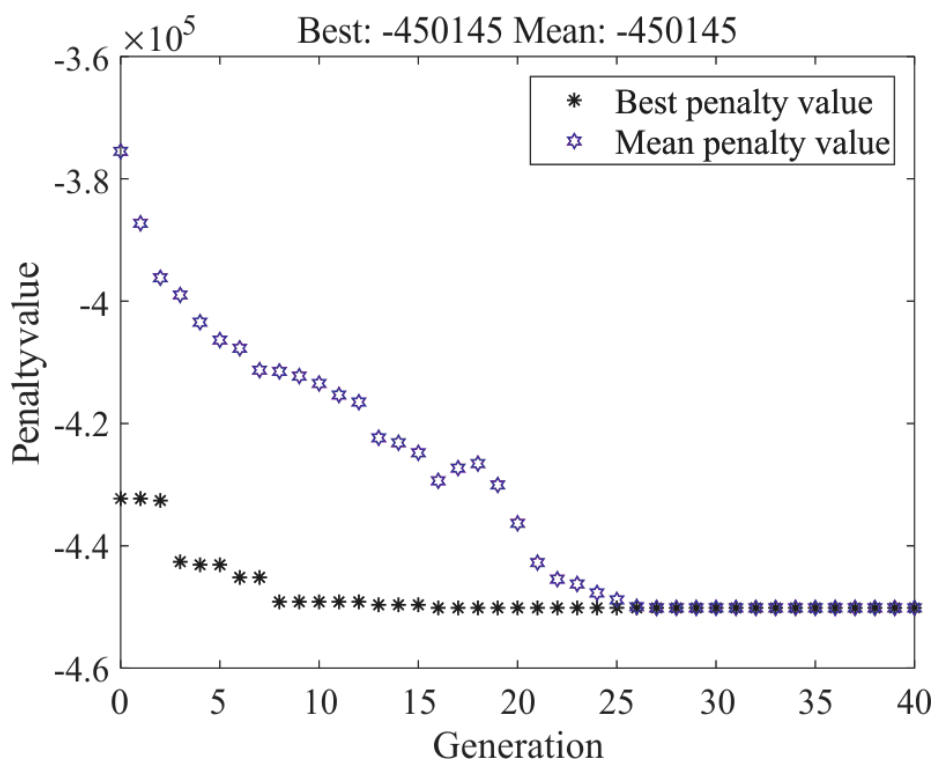


Рисунок 6.10 – Динаміка збіжності цільової функції моделі під час процесу оптимізації за допомогою ГА

Оскільки стандартні процедури ГА передбачають мінімізацію цільової функції, а цільова функція розробленої моделі підлягає максимізації, проведено мінімізацію цієї функції, взятої зі знаком мінус. На рисунку 6.11 показана діаграма руху двох високошвидкісних поїздів на лінії з використанням залізничного транспорту як допоміжного в міжмодальному пасажирському трафіку на обслуговування туристичного пасажирського трафіка.

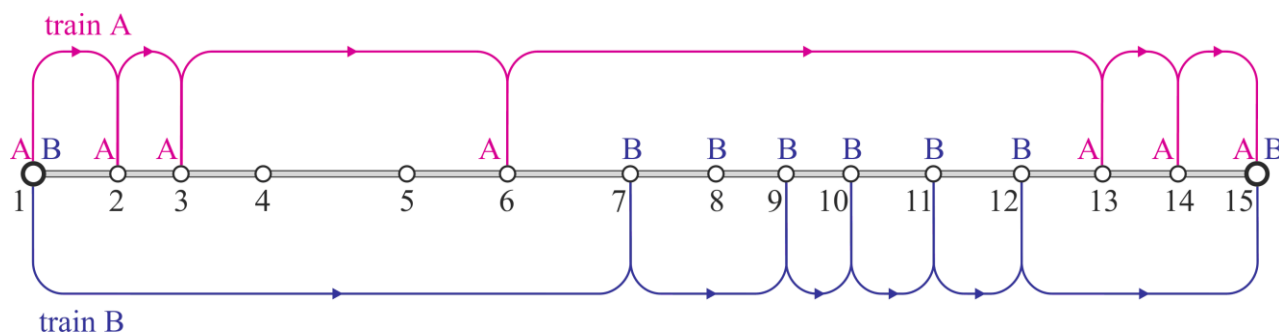


Рисунок 6.11 – Схема обслуговування напрямку двома швидкісними поїздами, отримана в результаті оптимізації розробленої моделі

Результати оптимізації показують, що сформована модель дає змогу зберегти до 90 % потенційного пасажирського туристичного потоку і обробити близько 50 % пасажирського трафіка між проміжними станціями маршруту.

6.7 Висновки до шостого розділу

Можливість подальшого розвитку туризму і досягнення нових якісних стандартів обслуговування пасажиропотоків у будь-якій країні потребує сучасного транспорту і сучасних технологій, у тому числі управлінських. Наприклад, для якісної організації круїзів на морських і річкових суднах необхідно забезпечити швидке та комфортне доставлення пасажирів за допомогою інших видів транспорту. Якісна організація туристичних поїздок неможлива без сучасних технологій управління інтермодальним пасажирським трафіком. Важливу роль в організації таких поїздок може відігравати високошвидкісний пасажирський транспорт як допоміжний вид транспорту. Однак успіх його використання в цій ролі залежить від здатності організувати його роботу так, щоб не знижувати загальну туристичну привабливість поїздки.

Аналіз системи інтермодального пасажирського транспорту з використанням високошвидкісних поїздів як допоміжного транспорту виявив складнощі, пов'язані з

факторами невизначеності. Ці фактори є причиною складнощів для оцінювання потенційних пасажиропотоків і часток потенційних пасажиропотоків які перетворюються на реальні пасажиропотоки за певних поточних умов здійснення перевезень. Особливо це стосується ліній, де курсують туристичні і регулярні пасажиропотоки.

Під час аналізу факторів, що впливають на привабливість використання поїздів як допоміжного транспорту, встановлено, що основними факторами є час руху високошвидкісного поїзда, який у свою чергу залежить від швидкості і відстані, вартість квитка. Однак урахування цих факторів для потреб управління експлуатаційною роботою пов'язано з невизначеністю, яка у свою чергу є наслідком суб'єктивного сприйняття, і психологічними факторами.

Розроблена нечітка модель для оцінювання корисності перевезення для пасажирів дала змогу ефективно подолати проблеми, пов'язані з невизначеністю суб'єктивного вибору та відповідними психологічними аспектами. Використання лише двох нечітких змінних – швидкості та відстані - дає можливість побудувати достатньо нескладну, але в той же час достатньо точну модель оцінювання корисності поїздки. У той же час запропонований спосіб використання нормалізованої функції корисності як функції імовірності дає змогу достатньо точно оцінити чисельність пасажирів, які за певних умов виберуть перевезення, і спланувати перевезення так, щоб охопити максимальний пасажиропотік.

Введення сучасних технічних засобів для підвищення швидкості руху поїздів на лінії може бути неможливим або непрактичним і дорогим. У таких умовах раціональним шляхом вирішення проблеми є розроблення технології планування маршрутів високошвидкісних поїздів на основі методу пропускання зупинок.

З цією метою сформована цільова функція, спрямована на збереження туристичного пасажирського потоку і одночасно на максимальну обробку пасажирських потоків між проміжними станціями поїздних маршрутів. Критерієм цільової функції є величина доходу залізничного оператора пасажирських перевезень. Сформована цільова функція та система обмежень являють собою оптимізаційну математичну модель змішаного програмування.

Отже, використання технології пропускання зупинок (англ. skip stop), запропоноване для планування роботи швидкісних поїздів, має на меті зробити туристичні маршрути привабливішими через скорочення часу подорожі інтермодального залізничного транспорту.

Цей підхід не лише забезпечить комфортні умови для перевезення туристів, але й сприятиме підтриманню належного рівня залізничними операторами прибутковості перевезень.

Однак для отримання якісного результату за допомогою використання сформованої моделі необхідні також і якісні вихідні дані.

Для отримання високоякісних вихідних даних для розрахунків сформована високоточна прогностична модель. Використання сучасних технологій штучного інтелекту, таких як генеративно-змагальні мережі, забезпечило високу точність прогнозування і подолання труднощів, пов'язаних із багатовимірними часовими рядами.

Завдяки тому, що для побудови прогнозової моделі використано нетривіальну архітектуру НМ, таку як GAN, ця модель ураховує складні зв'язки між різними факторами, що впливають на пасажирський потік, і забезпечує високу точність прогнозування. Використання GAN дає змогу уникнути втрати точності у врахуванні неочікуваних змін у попиті, що є критично важливим для ефективного управління мережею високошвидкісних поїздів і забезпечення оптимального обслуговування пасажирів на всьому маршруті. Така прогнозна модель дала змогу подолати проблему невизначеності, пов'язану з неповною інформацією, отримавши недостатню інформацію з історичних даних.

Для побудови оптимальної схеми курсування пасажирських поїздів на основі розробленої оптимізаційної математичної моделі сформовано процедуру її оптимізації в середовищі Matlab. Для подолання труднощів, пов'язаних із класом моделей змішаного нелінійного математичного програмування, до якого належить і розроблена модель, запропоновано застосування математичного апарату як основи для процедури оптимізації.

Використання сучасного математичного апарату ГА дало змогу знайти вектор змінних, у якому досягнуто екстремум цільової функції з достатньою для практичного використання точністю. Впевнена збіжність ГА в процесі вирішення завдання свідчить про адекватність сформованої моделі.

Результати оптимізації свідчать про те, що розроблена модель здатна зберегти до 90 % потенційного туристичного пасажирського потоку та забезпечити обробку близько 50 % пасажирського трафіка між проміжними станціями маршруту.

РОЗДІЛ 7

УДОСКОНАЛЕННЯ ТЕХНОЛОГІЇ ПРОСУВАННЯ КОНТЕЙНЕРНИХ ПОЇЗДІВ
НА НАПРЯМКУ У СКЛАДІ СИСТЕМИ ІНТЕРМОДАЛЬНИХ ПЕРЕВЕЗЕНЬ В
УМОВАХ НЕВИЗНАЧЕНОСТІ7.1 Аналіз взаємодії залізничного і морського транспорту в контексті
інтермодальних контейнерних перевезень

Контейнерні перевезення стали невід'ємною складовою сучасної логістики і торгівлі, їхня історія сягає середини ХХ століття. Перший крок до революції в транспортуванні товарів був зроблений у 1956 році, коли американець Малкольм Маклін, засновник компанії «Sea-Land», здійснив перше контейнерне перевезення з Ньюарка до Х'юстона. Цей інноваційний підхід полягав у використанні стандартизованих контейнерів, які можна було легко перевантажувати з одного виду транспорту на інший, не розвантажуючи вміст. Така стандартизація зменшила час і витрати на перевезення вантажів, зробивши їх більш безпечними та ефективними.

Згодом контейнерні перевезення швидко поширилися по всьому світу. Контейнери стали універсальною одиницею для транспортування товарів, що значно спростило міжнародну торгівлю, зменшило втрати під час транспортування і полегшило процеси митного оформлення. Завдяки цьому світова економіка отримала потужний стимул для зростання, а обсяги міжнародної торгівлі почали стрімко збільшуватися.

Важливу роль у розвитку контейнерних перевезень відіграли інтермодальні перевезення, які передбачають використання різних видів транспорту: морського, залізничного, автомобільного та повітряного. Інтермодальні перевезення стали можливими завдяки стандартизації контейнерів, що дало змогу легко переміщувати їх між різними транспортними засобами. Це призвело до виникнення нових логістичних концепцій, таких як сухопутні мости, що сполучають морські порти з

внутрішніми районами країн за допомогою залізничного або автомобільного транспорту.

Одним із найуспішніших прикладів сухопутного мосту є «Лос-Анджелес - Лонг-Біч – Чикаго», що з'єднує порти Лос-Анджелеса та Лонг-Біч із внутрішніми районами США через залізничний коридор до Чикаго. Цей сухопутний міст є життєво важливим для економіки США, оскільки можна ефективно транспортувати товари з Азії до внутрішніх ринків країни. Контейнери, що прибувають у порти Лос-Анджелеса та Лонг-Біч, швидко перевантажують на залізничні платформи і відправляють до Чикаго, одного з найбільших транспортних вузлів у Північній Америці. Цей коридор дає змогу значно скоротити час доставлення товарів порівняно з виключно автомобільними перевезеннями, зменшити витрати на транспортування та знизити екологічне навантаження завдяки використанню залізничного транспорту.

Іншим прикладом є залізничний коридор між портом Роттердам у Нідерландах і промисловими центрами Німеччини та Центральної Європи. Роттердам, один із найбільших портів світу, є важливим логістичним центром, що обслуговує значну частину вантажів, які прибувають до Європи. Контейнери з товаром, що прибувають морем, швидко завантажують на залізничні платформи і транспортують до таких міст, як Дуйсбург, Мюнхен, Відень та інші. Цей залізничний коридор забезпечує швидке і надійне сполучення між морським портом і внутрішніми ринками, що є критично важливим для підтримання стабільних поставок товарів.

Інтермодальні перевезення не лише скорочують час доставлення, але й знижують витрати на транспортування та зменшують екологічне навантаження завдяки ефективнішому використанню різних видів транспорту [177]. Вони також сприяють більш гнучкому реагуванню на зміни в попиті на перевезення, забезпечуючи безперебійну роботу глобальних ланцюгів постачання.

З розвитком технологій і автоматизації контейнерні та інтермодальні перевезення продовжують вдосконалюватися [178]. Впровадження систем відстеження контейнерів у режимі реального часу, автоматизованих терміналів для

завантаження та розвантаження контейнерів, а також новітніх інформаційних систем для управління логістикою забезпечує високу точність і ефективність процесів перевезення. Ці інновації дають змогу значно знизити ризики та покращити якість обслуговування клієнтів.

З моменту появи контейнерів у середині ХХ століття залізничний транспорт розвивався як ефективний засіб перевезення вантажів на суші, забезпечуючи безперебійні зв'язки між морськими портами та внутрішніми ринками.

Контейнерні перевезення продовжують демонструвати стійкий ріст (рисунок 7.1), особливо в розвинених країнах, де вони часто становлять понад 50 % загального обсягу вантажоперевезень.

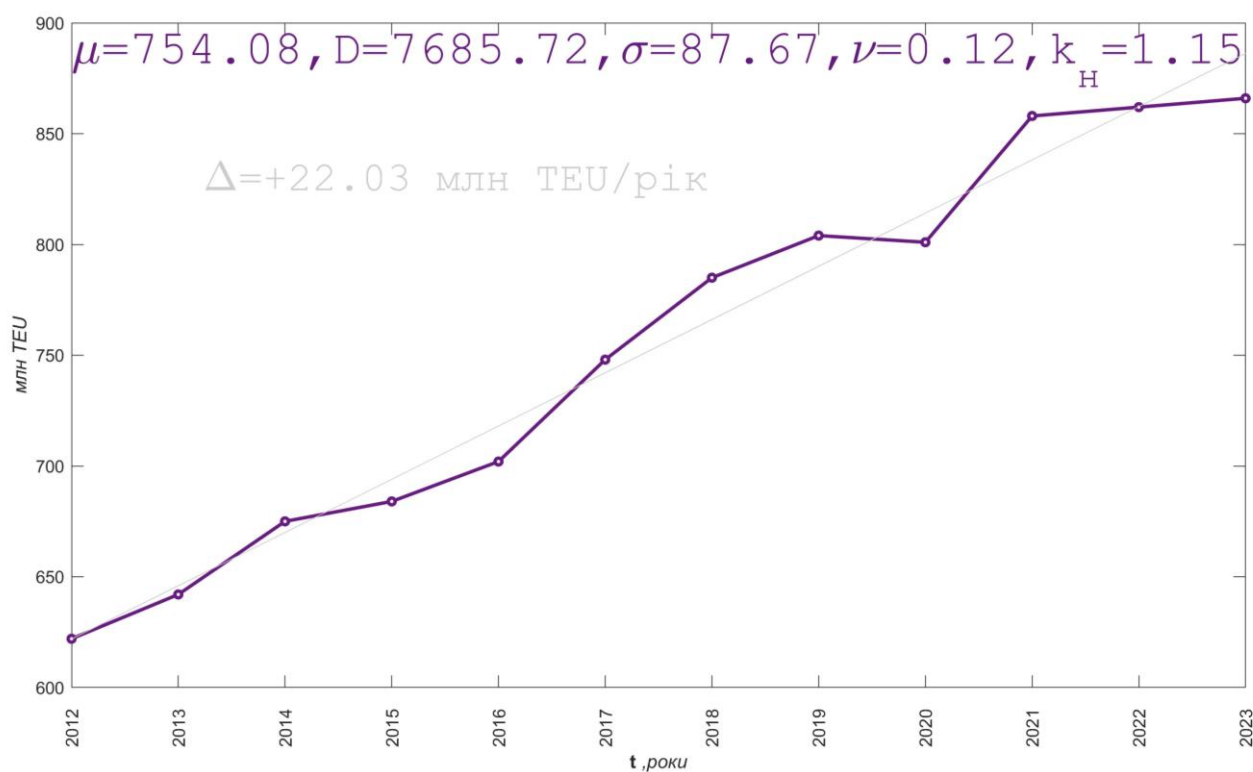


Рисунок 7.1 – Світова динаміка річних обсягів контейнерних перевезень у перерахунку на TEU

Відповідно до отриманого тренда останнього десятиріччя (рисунок 7.1) щорічний приріст обсягів контейнерних перевезень на наступні роки становитиме близько 22 млн контейнерів у перерахунку на TEU.

Таке зростання обумовлено кількома факторами, включаючи глобалізацію торгівлі, розвиток міжнародних логістичних ланцюгів і збільшення споживчого попиту на товари. Контейнеризація ефективно об'єднує різні види транспорту, спрощуючи процес транспортування та знижуючи витрати.

Розвинені країни, маючи сучасні портові і транспортні інфраструктури, активно інвестують у розширення та оптимізацію контейнерних терміналів, що сприяє подальшому збільшенню обсягів перевезень. З кожним роком зростає не тільки кількість контейнерів, а й їхній розмір, що дає змогу значно збільшити вантажопідйомність суден і покращити ефективність логістичних операцій.

Основним моментом у цьому процесі є розвиток інтермодальних перевезень, де контейнери можуть легко переміщатися між різними видами транспорту — від морського до залізничного та автомобільного. Це робить контейнерні перевезення більш гнучкими і адаптивними до змінюваних умов ринку, а також мінімізує затримки і знижує екологічний слід.

Отже, зростаючі обсяги контейнерних перевезень не лише відображують динаміку світової економіки, але й демонструють важливість контейнеризації для ефективного управління сучасними логістичними ланцюгами.

Залізничний транспорт має ряд переваг, які роблять його ідеальним для використання на сухопутних мостах у контексті інтермодальних перевезень. По-перше, залізничний транспорт є одним із найефективніших щодо екологічного впливу. Він має значно менший вуглецевий слід порівняно з автомобільним транспортом [179]. Наприклад, перевезення одного контейнера залізницею викидає приблизно на 75 % менше CO₂, ніж аналогічне перевезення вантажів автотранспортом (рисунок 7.2).

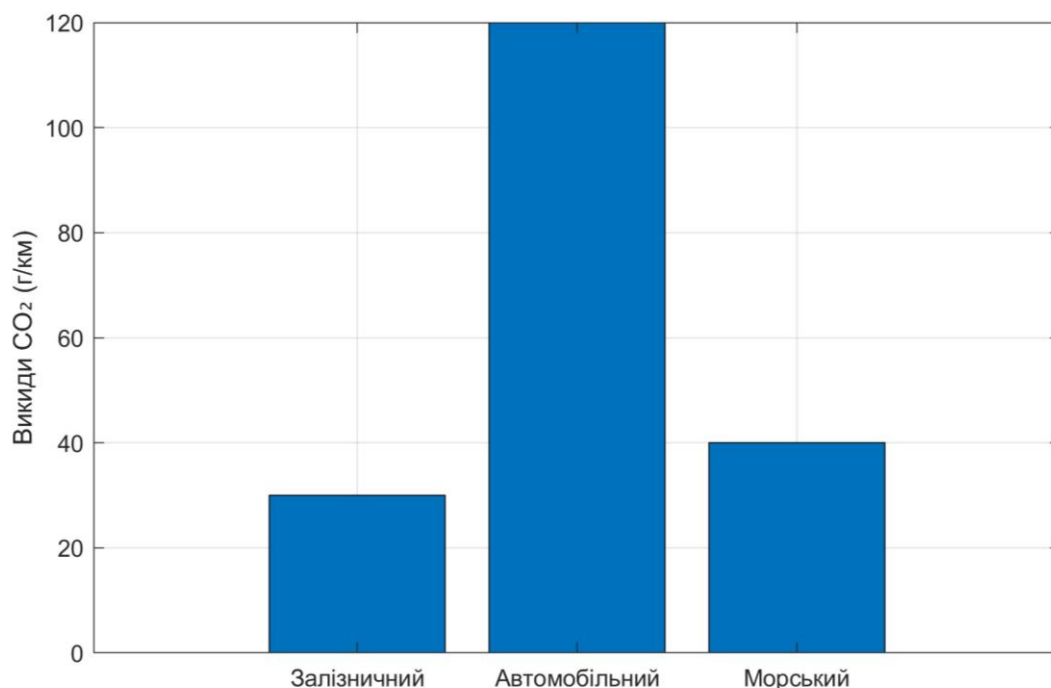


Рисунок 7.2 – Середні обсяги викидів діоксиду вуглецю різними видами транспорту в процесі здійснення інтермодальних перевезень для перевезення одного двадцятифутового контейнера (TEU)

Це робить залізничні перевезення більш екологічно чистими і відповідає сучасним вимогам сталого розвитку.

По-друге, залізничний транспорт менш чутливий до погодних умов. На відміну від автомобільного транспорту, який може зазнавати затримок через сильні дощі або снігопади, залізничний рух залишається стабільним незалежно від погодних умов. Це особливо важливо для дотримання графіків доставлення та уникнення затримок, які можуть коштувати компаніям значних грошей.

Також залізничний транспорт має перевагу в плані безпеки. Залізничні маршрути зазвичай менш схильні до аварій і заторів, ніж автомобільні дороги. На автодорогах США щорічно відбуваються мільйони дорожньо-транспортних пригод. Наприклад, у 2020 році в США автомобільний транспорт зазнав приблизно 38680 пригод лише зі смертельними випадками, з них близько 5 % пов'язані з комерційними вантажними транспортними засобами, включаючи автомобілі, що перевозять контейнери, тоді як залізничні перевезення вважали одним із найменш

небезпечних способів транспортування. Відсутність заторів на залізничних шляхах також забезпечує більш надійні строки доставлення. Крім того, інтермодальні перевезення є важливими для безпеки і в стратегічному плані, адже вони забезпечують доставлення життєво важливих вантажів по всьому світу. Умови пандемії підкреслили важливість мультимодальних перевезень, особливо ланки, що є поєднанням залізничного та морського транспорту, як ключовий сектор для безперебійного постачання життєво важливих товарів і глобальної торгівлі під час кризи, фази відновлення та після повернення до нормального стану [180].

Важливим фактором є також економічна ефективність залізничного транспорту. Перевезення контейнерів залізницею зазвичай дешевше, ніж автоперевезення, особливо для транспортування великих обсягів вантажів на довгі відстані [181]. Наприклад, залізничний коридор між портом Роттердам і внутрішніми районами Німеччини значно зменшує витрати на перевезення порівняно з автотранспортом, що особливо важливо для великих логістичних операторів.

Вантажні перевезення наземним транспортом поєднують дреяж, тобто вантажні перевезення на короткі відстані (англ. drayage), і залізничні послуги на далекі відстані для доставлення вантажів у контейнерах через континентальну масу за допомогою залізнично-автомобільних перевантажувальних терміналів. Наприклад, північноамериканська система сухопутних мостів перетворилася на ефективну та складну транспортну систему, яка є конкурентоспроможною альтернативою для вантажних перевезень через Панамський канал [182].

Отже, залізничний транспорт на сухопутних мостах є основним елементом ефективних інтермодальних перевезень. Його переваги - знижений вуглецевий слід, нечутливість до погодних умов, безпека та економічність - роблять його оптимальним вибором для сучасних логістичних рішень. Це не лише сприяє зменшенню негативного впливу на навколишнє середовище, а й забезпечує стабільність і надійність в умовах зростаючих вимог до перевезення товарів у глобальному масштабі.

Отже, історія взаємодії залізничного та морського транспорту в контексті інтермодальних контейнерних перевезень демонструє їхню важливу роль у глобалізації та економічному зростанні. Вони стали основою сучасної світової економіки, забезпечуючи швидке та надійне транспортування товарів по всьому світу. Завдяки контейнерним перевезенням та інтермодальним системам світ став меншим і більш взаємопов'язаним, а можливості для міжнародної торгівлі та співробітництва значно зросли.

7.2 Дослідження природи та параметрів контейнеропотоків до залізничних термінальних станцій у процесі формування контейнерних поїздів

Дослідження природи та параметрів контейнеропотоків до залізничних термінальних станцій у процесі формування контейнерних поїздів є основним елементом для оптимізації логістичних процесів і мінімізації ризиків, пов'язаних із невизначеністю в контейнерних перевезеннях [183]. Розуміння того, як контейнери надходять на термінальні станції, дає змогу розробити більш ефективні стратегії для планування та управління транспортними операціями.

Контейнеропотоки до залізничних терміналів є стохастичними процесами, для яких характерні варіабельність і непередбачуваність. Потоки контейнерів залежать від багатьох факторів, включаючи сезонність, коливання попиту на ринку, погодні умови і транспортні затори. Також важливим є вплив економічних змін і політичних подій, які можуть суттєво впливати на інтенсивність контейнеропотоків.

Для більш глибокого аналізу природи контейнеропотоків необхідно враховувати різні аспекти, такі як середній час прибуття контейнерів, імовірність затримок, рівень заповнюваності контейнерних місць та інші параметри. Використання статистичних методів і моделей прогнозування дає змогу оцінити основні характеристики цих потоків і виявити закономірності, які можуть бути використані для покращення процесів формування контейнерних поїздів.

Також важливо враховувати специфіку взаємодії різних видів транспорту для доставлення контейнерів на залізничні термінали. Автомобільний транспорт, який часто використовують для доставлення контейнерів до станцій, має свої особливості, що можуть впливати на своєчасність і регулярність надходження контейнерів. Аналіз цих взаємодій дає змогу розробити більш гнучкі та адаптивні логістичні схеми, що враховують можливі затримки і непередбачувані обставини.

Вивчення природи та параметрів контейнеропотоків є невід'ємною складовою загальної стратегії управління інтермодальними перевезеннями. Воно сприяє не лише оптимізації процесів формування контейнерних поїздів, але й підвищенню загальної ефективності логістичних ланцюгів, що є надзвичайно важливим у сучасних умовах глобальної торгівлі та економічної невизначеності.

Зокрема, важливим є дослідження розподілу інтервалів часу між прибуттям контейнерів, а також аналіз впливу різних факторів на ці інтервали. Знаючи розподіл, можна моделювати процеси накопичення контейнерів на станціях і ухвалювати обґрунтовані рішення про оптимальний час формування поїздів. Це також допомагає знизити ризики простоїв і фінансових втрат, пов'язаних із недостатньою кількістю контейнерів для відправлення.

Визначення природи випадкового процесу прибуття контейнерів на термінальну залізничну станцію, його структури і параметрів є важливим етапом для подальшої оптимізації технології доставлення контейнерів. Для аналізу випадкового процесу, такого як потік контейнерів на станцію, першочерговим завданням є оцінювання його стаціонарності.

Стаціонарний процес – це такий процес, статистичні властивості якого не змінюються з часом. Іншими словами, стаціонарний процес має постійну середню величину, дисперсію і автокореляційну функцію, яка залежить лише від різниці між часовими моментами, а не від самого часу [190].

Для перевірки стаціонарності пуассонівського процесу прибуття контейнерів застосовують різні статистичні методи, включаючи тестування на гомоскедастичність і перевірку на відсутність трендів у часових рядах інтервалів між прибуттями. Одним із таких методів є застосування тесту Дікі-Фуллера (англ.

Augmented Dickey-Fuller test, ADF) [191] і тесту Квятковського-Філіпса-Шмідта-Шина (англ. Kwiatkowski-Phillips-Schmidt-Shin test, KPSS) [192].

За ADF-тестом перевіряють гіпотезу про наявність одиничного кореня в часовому ряді, що є індикатором нестационарності. Нульова гіпотеза тесту полягає в тому, що часовий ряд має одиничний корінь, тобто є нестационарним, відповідно відхилення нульової гіпотези вказує на стаціонарність процесу.

Отже, нульова гіпотеза ADF-тесту стверджує, що часовий ряд є нестационарним, у той час як альтернативна гіпотеза припускає, що ряд стаціонарний. Тест базований на регресійному аналізі з дослідженням часових залежностей і автокореляції. Якщо отримане значення тестової статистики менше критичних значень, нульова гіпотеза відхиляється, що свідчить про стаціонарність часового ряду.

Тест Дікі-Фуллера (ADF) базований на модифікації авторегресійної моделі:

$$\Delta y_t = \alpha + \beta t + \gamma y_{t-1} + \sum_{i=1}^p \delta_i \Delta y_{t-1} + \varepsilon_t, \quad (7.1)$$

де y_t – значення параметра випадкового процесу (подано як елемент часового ряду) в момент часу t ;

Δ – оператор різниці;

α – константа;

βt – лінійний тренд;

γ – коефіцієнт для лагу;

δ_i – коефіцієнти для лагів;

ε_t – випадкова помилка.

Нульова гіпотеза тесту: $\gamma = 0$ (присутній одиничний корінь). Альтернативна гіпотеза: $\gamma < 0$ (відсутній одиничний корінь).

Кінцева формула для ADF-статистики (тест Дікі-Фуллера)

$$ADF = \frac{\hat{\gamma}}{SE(\hat{\gamma})}, \quad (7.2)$$

де $\hat{\gamma}$ – оцінка коефіцієнта для лагу в регресії;

$SE(\hat{\gamma})$ – стандартна помилка цієї оцінки.

Тест KPSS пропонує альтернативний підхід для оцінювання стаціонарності. Нульова гіпотеза тесту KPSS стверджує, що часовий ряд є стаціонарним, у той час як альтернативна гіпотеза припускає його нестационарність. Відхилення нульової гіпотези вказує на наявність тренда або змінної дисперсії, що є ознакою нестационарності. Тест KPSS аналізує рівень стаціонарності за допомогою залишкових рядів, що дає змогу оцінити, наскільки добре ряд може бути поданий як сума стаціонарного процесу і детермінованої трендової компоненти.

Тест KPSS оцінює стаціонарність за допомогою формули

$$KPSS = \frac{1}{T^2} \sum_{t=1}^T \left(\sum_{s=1}^T \hat{y}_s \right)^2, \quad (7.3)$$

де T – загальна кількість спостережень;

$\hat{y}_s$ – відхилення від середнього значення (або тренда).

Нульова гіпотеза: ряди стаціонарні. Альтернативна гіпотеза: ряди нестационарні. Якщо значення KPSS перевищує критичні значення, нульову гіпотезу відхиляють.

Отже, поєднання результатів тестів ADF та KPSS дає змогу отримати комплексну картину стаціонарності пуассонівського процесу прибуття контейнерів. У разі, якщо інтервали між прибуттями контейнерів поділені за експоненційним законом, а результати тестів вказують на стаціонарність, можна зробити висновок, що процес є стаціонарним. Це дасть додаткові переваги для моделювання та прогнозування, оскільки стаціонарні процеси мають більш передбачувані властивості та спрощують застосування статистичних методів аналізу.

На рисунку 7.3, а наведено процес надходження контейнерів до однієї з залізничних станцій Польщі (дані наведені в таблиці Ж.2, додаток Ж), який подано як випадковий точковий процес.

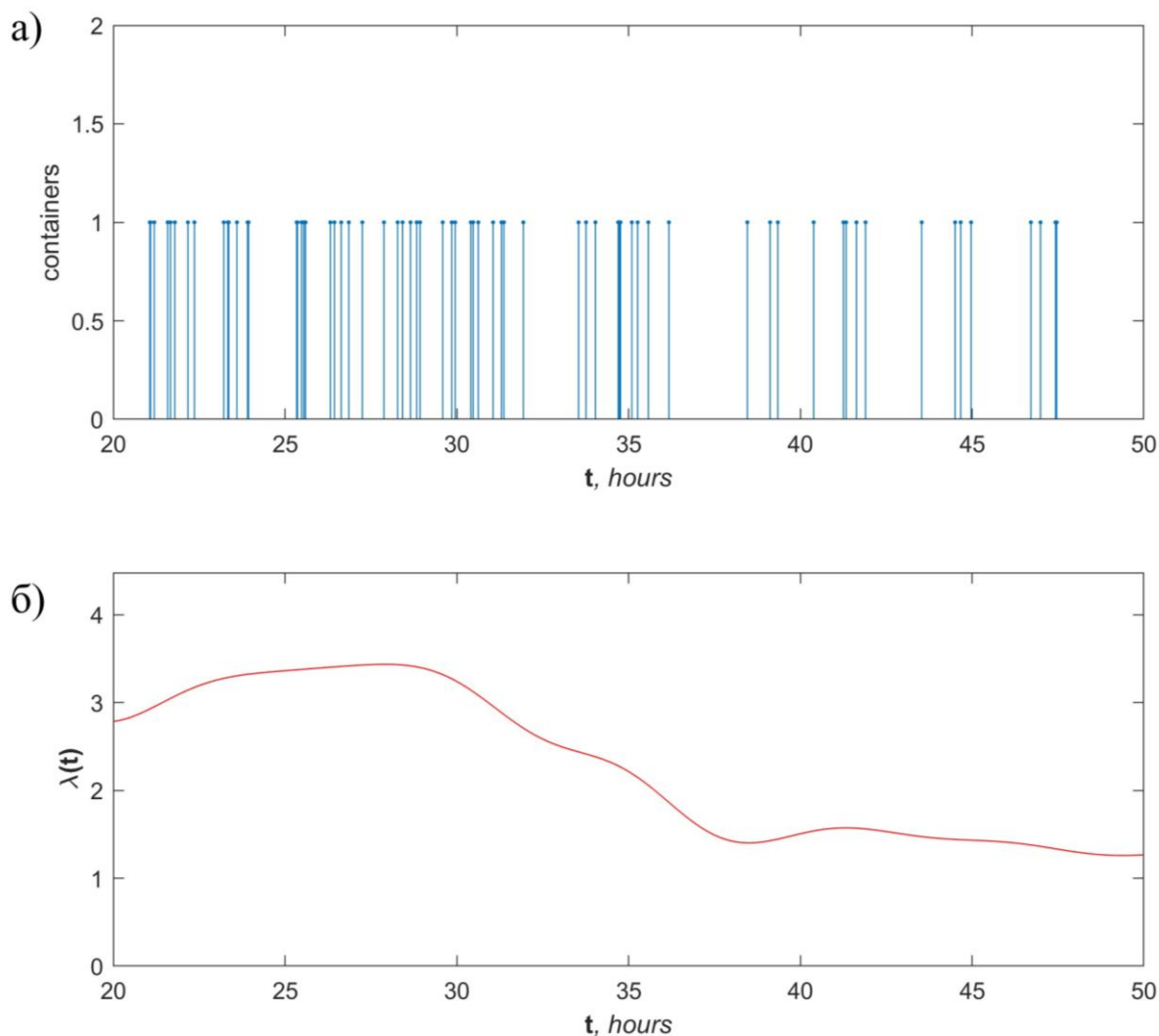


Рисунок 7.3 – Візуалізація процесу надходження контейнерів до термінальної залізничної станції: а) у вигляді випадкового точкового процесу: б) функції інтенсивності процесу залежно від часу

Крім того, оцінено емпіричну інтенсивність процесу [193], результат якої наведено на рисунку 7.3, б. Для аналізу інтенсивності потоку прибуття контейнерів на термінальну залізничну станцію застосовано метод ядерної оцінки щільності (англ. Kernel Density Estimation, KDE) [194], за яким оцінюють функцію

щільності ймовірності на основі наявних даних про час прибуття контейнерів. Основними компонентами методу є вибір ядра, яке має бути симетричним і інтегруватись до одиниці, і ширини смуги пропускання, яка визначає ступінь згладжування оцінки.

Використовуючи гауссове ядро та оптимальну ширину смуги пропускання, побудовано оцінку інтенсивності потоку. Результати показали зміни інтенсивності прибуття контейнерів у часі, що дає змогу детально проаналізувати характер потоку, виявити можливі закономірності, а отже, зробити висновки про характер процесу, наприклад його стаціонарність чи нестаціонарність, і планувати та оптимізувати операції на термінальній станції.

Після оцінювання інтенсивності потоку прибуття контейнерів за допомогою методу ядерної оцінки щільності (KDE) стало очевидним, що інтенсивність потоку не є постійною та змінюється у часі (рисунку 7.3, б). Така динаміка інтенсивності свідчить про складний характер процесу прибуття контейнерів, що може мати суттєвий вплив на організацію та планування роботи термінальної залізничної станції.

Використовуючи ядерну оцінку щільності, побудовано графік інтенсивності потоку прибуття контейнерів, який наочно демонструє зміну інтенсивності в різні моменти часу. Виявлено, що інтенсивність змінюється з періодами підвищення та зниження, що може бути зумовлено різними факторами, такими як ГРП, сезонні коливання попиту на транспортні послуги, погодні умови тощо.

Для підтвердження нестаціонарності процесу застосовано два статистичні тести: тест на наявність одиничного кореня Дікі-Фуллера (ADF) і KPSS-тест. Результати тестів наведено в таблиці 7.1.

Як видно з таблиці 7.1, тести використовують протилежні нульові гіпотези.

На основі отриманих результатів можна зробити такі висновки за ADF-тестом: значення ADF статистики (-9.879) менше критичного значення (-1.942), що свідчить про те, що процес є нестаціонарним; р-значення (0.0816) більше за рівень значущості 0.05, тому нема підстав відхилити нульову гіпотезу про нестаціонарність ряду.

Таблиця 7.1 – Результати ADF- та KPSS-тестів

статистика	нульова гіпотеза (H0)	відхи- ляється	значення	допоміжні параметри	
				р-значення	критичне значення
ADF	Ряд має одиничний корінь (є нестационарним)	Ні	-9.87888	0.081642	-1.94194
KPSS	Ряд є стаціонарним	Так	0.21089	0.011917	0.14600

Результат ADF-тесту вказує на те, що процес нестационарний. Висновки щодо результатів KPSS-тесту такі: значення статистики тесту KPSS (0.211) більше критичного значення (0.146) і на додачу до цього р-значення (0.012) менше за рівень значущості 0.05, що дає всі підстави відхилити нульову гіпотезу про стаціонарність ряду.

Результат KPSS-тесту показує, що процес нестационарний. Отже, обидва тести (ADF і KPSS) узгоджено вказують на нестационарність досліджуваного часового ряду. Це важливий висновок, який необхідно враховувати для подальшого аналізу та моделювання такого процесу.

Результати тестів чітко вказують на нестационарність процесу надходження контейнерів.

Після проведення тестів на стаціонарність, зокрема тестів ADF та KPSS, якщо встановлено, що процес є нестационарним, виникає необхідність більш глибокого аналізу його структури. Нестационарність процесу може свідчити про наявність трендів, сезонних коливань або змінної інтенсивності подій. У таких випадках традиційні методи прогнозування для стаціонарних процесів не можуть бути безпосередньо застосовані, тому потрібно шукати способи адаптації до змінної інтенсивності. Однак основним моментом є те, що, навіть якщо інтенсивність процесу змінюється, можна спробувати розглядати її як функцію часу: $\lambda = \lambda(t)$.

Для повного з'ясування природи такого випадкового процесу необхідне проведення подальших досліджень.

На рисунку 7.4 наведені дані про тривалість часових інтервалів між надходженнями контейнерів до залізничної станції, що відповідають досліджуваному процесу (наведеному на рисунку 7.3, а).

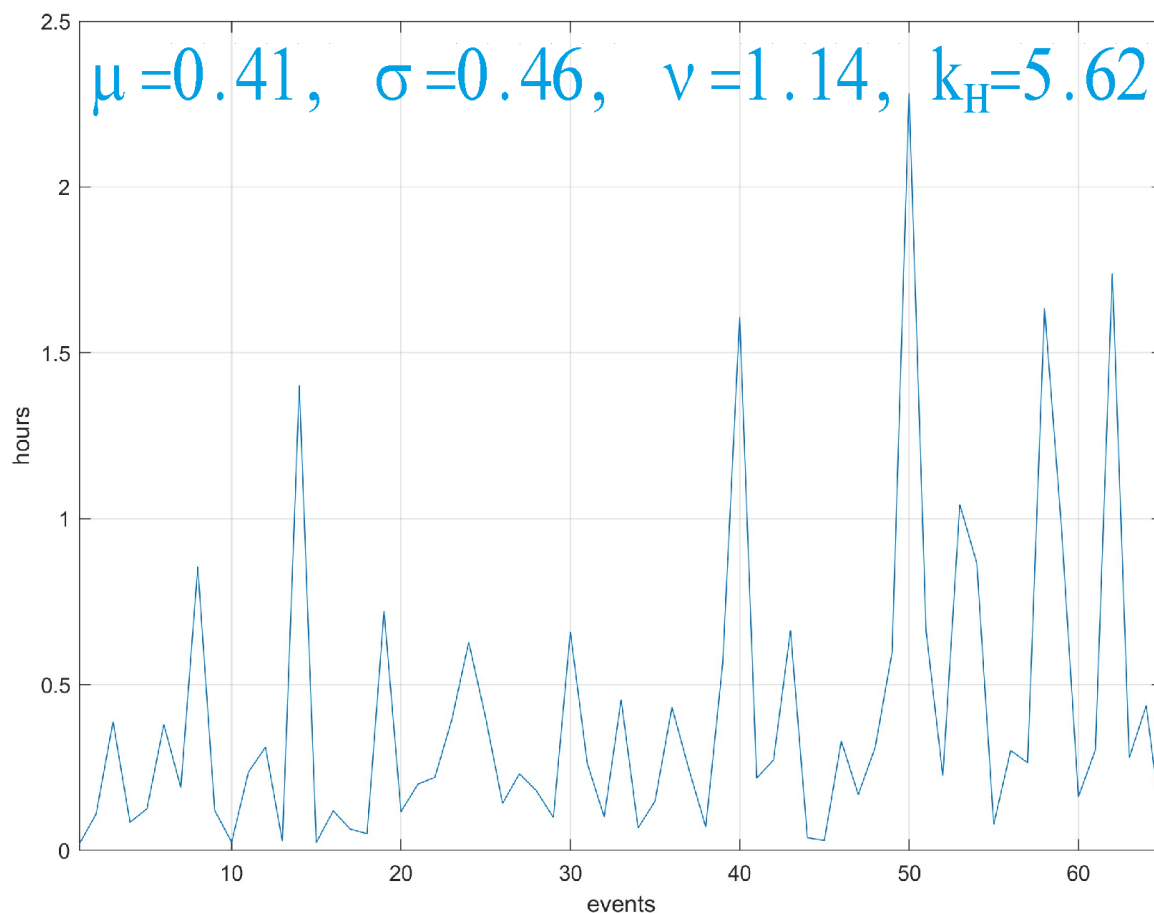


Рисунок 7.4 – Графік часових інтервалів між послідовними подіями надходження контейнерів до залізничної термінальної станції

Одним з ефективних методів аналізу є побудова статистичної гістограми для інтервалів між прибуттями контейнерів. Цей метод дає змогу візуально та кількісно оцінити розподіл інтервалів і перевірити їхню відповідність певному теоретичному розподілу.

Для аналізу інтервалів часу між прибуттями контейнерів застосовано метод гістограми. Зокрема, для перевірки гіпотези про те, що процес є пуассонівським, побудували гістограму інтервалів між прибуттями контейнерів і порівняли їх з експоненційним [185] розподілом (рисунок 7.5).

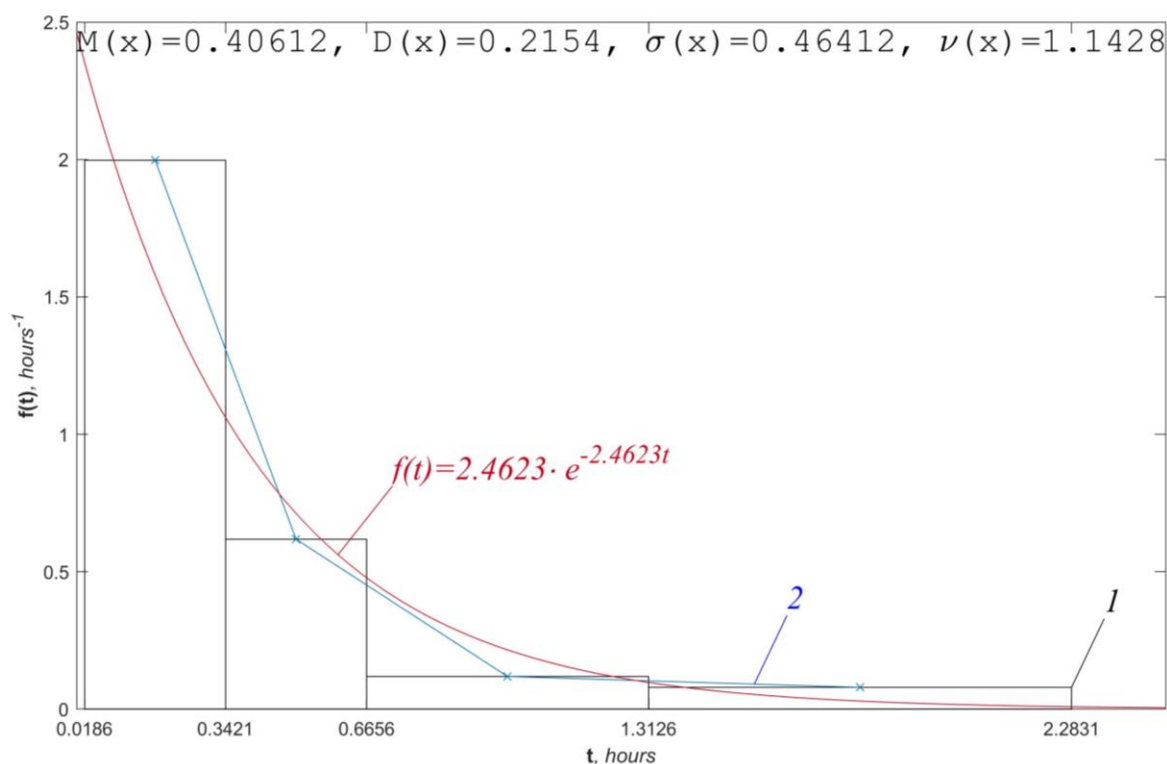


Рисунок 7.5 – Часовий ряд інтервалів між надходженнями контейнерів до залізничної термінальної станції

Процес, описаний пуассонівським потоком, характеризується тим, що інтервали часу між подіями (у цьому випадку між прибуттями контейнерів) мають експоненційний розподіл. Експоненційний розподіл має таку функцію щільності ймовірності:

$$f(x) = \lambda e^{-\lambda x}, \quad (7.4)$$

де λ - параметр розподілу, який є інтенсивністю потоку.

Після побудови гістограми інтервалів і накладання теоретичної кривої експоненційного розподілу проведено статистичний тест на відповідність емпіричного розподілу експоненційному. Дані розрахунків для побудови гістограми і порівняння емпіричного і теоретичного розподілу наведені в таблиці 7.2.

Таблиця 7.2 – Дані розрахунків за методом гістограми

номер розряду	ліва границя розряду	права границя розряду	середина розряду	ширина розряду	емпірична частість	емпірична імовірність	очікувана частість	очікувана частість
1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	0.01859	0.34209	0.18034	0.32350	42	0.64615	0.55121	34.09601
2	0.34209	0.66559	0.50384	0.32350	13	0.20000	0.24853	15.37316
3	0.66559	1.31259	0.98909	0.64700	5	0.07692	0.16258	10.05665
4	1.31259	2.28310	1.79785	0.97050	5	0.07692	0.03768	2.33089
Разом:				2.26451	65	1.00000	1.00000	61.85671
$\chi^2 = 7.7976$				$\chi_{кр}^2 = 9.4877$		$p = 0.168$		

У таблиці 7.2 наведені дані про розподіл діапазону варіювання безперервної випадкової величини на дискретні інтервали (розряди), розрахунки і результати порівняння емпіричних і теоретичних даних.

Застосовані методи дали змогу визначити, що інтервали часу між прибуттями контейнерів розподілені за експоненційним законом. Для підтвердження візуальної схожості гістограми та кривої щільності експоненційного розподілу застосовано критерій Хі-квадрат Пірсона [186, 187], який також підтвердив той факт, що відкидати гіпотезу про експоненційний розподіл нема підстав, адже отримане значення критерію не перевищує відповідне критичне значення, як видно з таблиці 7.2.

На основі отриманих результатів зроблено висновок, що процес прибуття контейнерів є пуассонівським. До того ж було виявлено, що процес також є ординарним [188], тобто одночасно може відбутися не більш ніж одна подія надходження контейнера.

Пуассонівський процес має такі властивості [184, 189]:

- 1) події відбуваються незалежно одна від одної;
- 2) імовірність настання події в малому інтервалі часу є пропорційною довжині цього інтервалу;
- 3) кількість подій, які відбуваються в інтервалах часу, що не перетинаються, є незалежною.

Зважаючи на те, що досліджуваний процес є нестационарним, його характеристика інтенсивності змінюється з часом. Проте, попри нестационарність, цей процес демонструє певні ознаки пуассонівського процесу, зокрема значну незалежність подій. Це означає, що між моментами прибуття контейнерів нема суттєвої кореляції, а самі події відбуваються випадково, без впливу на подальші.

Зрозуміло, що такі нестационарні процеси є теоретично складними для прогнозування. Вони мають високий ступінь невизначеності через постійну зміну інтенсивності подій, що ускладнює точне визначення моментів окремих подій. Проте, незважаючи на це, процеси, подібні до досліджуваного, належать до класу процесів Кокса.

Процес Кокса — це тип випадкового процесу, у якому інтенсивність подій змінюється з часом, залежно від латентної змінної. Це означає, що хоча точне прогнозування моментів подій практично неможливе через латентну природу процесу, все ж таки можна побудувати модель, що описує його функцію інтенсивності. Для цього необхідно оцінити латентний процес, а потім накласти модель пуассонівського процесу на змінну інтенсивність. Такий підхід дає змогу прогнозувати кількість подій за певний проміжок часу, а також давати корисні оцінки для планування й оптимізації, незважаючи на присутність невизначеності в самій моделі.

Цей метод прогнозування не дає можливості визначити точний момент кожної події, але забезпечує цінну інформацію про очікувану інтенсивність подій у часі, що є важливим для планування і управління процесами на залізничних станціях або в інших сферах, де події є випадковими, але мають певну закономірність у своїй інтенсивності.

7.3 Розроблення моделі управління процесом формування контейнерних поїздів у рамках системи міжнародних інтермодальних перевезень

Сучасні глобальні логістичні системи характеризуються інтеграцією різних видів транспорту, що посилюється. У цьому контексті взаємодія залізничного та морського транспорту з доставленням контейнерів на судна-контейнеровози набуває особливої значущості. Ефективна координація діяльності залізничних і морських перевізників, портових операторів і логістичних компаній є основним фактором успішної реалізації інтермодальних перевезень. Оптимізація процесів планування та синхронізації ГРП і суден, точне визначення строків завантаження та розвантаження контейнерів, а також ефективне використання портової та залізничної інфраструктури є невід'ємними елементами підвищення ефективності взаємодії різних видів транспорту.

Організація перевезення контейнерів від складів до пункту відправлення на судна-контейнеровози є критично важливим фактором для забезпечення своєчасного та надійного доставлення вантажів у сучасних міжконтинентальних інтермодальних перевезеннях. Оптимізація процесів формування та руху контейнерних поїздів у напрямку портів має велике значення для мінімізації часу зберігання та простою контейнерів, а також підвищення операційної ефективності всього ланцюжка поставок.

З розробленням моделей управління та СППР для інтермодальних операторів слід приділяти особливу увагу зв'язку між процесами надходження контейнерів на залізничні станції та формування контейнерних поїздів. Раціональний підхід для створення таких моделей має ґрунтуватися на визнанні ймовірнісного характеру процесу надходження контейнерів на станції.

Під час аналізу процесу прибуття контейнерів встановлено, що інтенсивність цього потоку змінюється залежно від часу та зовнішніх умов. Це відкриття підкреслює необхідність розроблення адаптивної моделі управління, яка дасть змогу ефективно формувати контейнерні поїзди з урахуванням динамічності інтенсивності

прибуття. Подальші дослідження спрямовані на створення такої моделі, яка не лише забезпечить оптимізацію процесу, але й підвищить загальну ефективність функціонування залізничної станції. Така модель має насамперед допомагати визначати оптимальний час формування поїздів з урахуванням мінливої інтенсивності надходження контейнерів; забезпечувати ефективне використання доступних ресурсів інфраструктури і технічних засобів станції відповідно до зміни характеристик контейнеропотоків, у такий спосіб зменшуючи рівень невизначеності в управлінській ланці.

Транспортування вантажів в інтермодальних контейнерах характеризується необхідністю ефективної організації процесу переміщення матеріальних потоків, які відрізняються високою питомою вартістю порівняно з вантажами, що доставляють залізницею в рамках внутрішніх перевезень.

Використання залізничного транспорту в інтермодальних контейнерних перевезеннях обґрунтовано такими його характеристиками, як висока вантажопідйомність, здатність перевозити великі обсяги вантажів та енергоефективність. Залізничні перевезення також дають стійку і надійну альтернативу автомобільному транспорту, особливо на далеких відстанях, що сприяє зниженню викидів шкідливих речовин у навколишнє середовище.

Технологія накопичення контейнерних партій і формування контейнерних поїздів є важливим елементом контейнерних перевезень. Вона передбачає координацію різних логістичних операцій, таких як завантаження, розвантаження і транспортування контейнерів, для забезпечення своєчасного і ефективного доставлення контейнерів до кінцевого пункту призначення.

Однією з головних проблем у цьому процесі є необхідність управління великою кількістю контейнерів, які зазвичай задіяні в операціях із контейнерних перевезень. Для вирішення цієї проблеми багато судноплавних компаній використовують спеціалізовані програмні системи, щоб відслідковувати місцезнаходження окремих контейнерів у режимі реального часу. Ці системи також можуть бути використані для оптимізації маршрутів і планування контейнерних

перевезень, що сприяє мінімізації транзитного часу і зниженню транспортних витрат.

Системи контейнерних перевезень характеризуються використанням спеціалізованих залізничних поїздів для транспортування контейнерів від внутрішніх регіонів до портів [195, 196]. Ці поїзди, які складаються з ряду з'єднаних вагонів, призначені виключно для перевезення контейнерів. Такий спосіб переміщення великих обсягів контейнерів на значні відстані може бути ефективним і економічно вигідним засобом доставлення вантажів від внутрішніх районів країни до портів.

Крім спеціалізованих залізничних поїздів, багато судноплавних компаній також застосовують автомобільний транспорт та інші види перевезень для доставлення контейнерів від внутрішніх регіонів до портових терміналів. Це може включати використання спеціалізованих контейнеровозів, здатних транспортувати один або декілька контейнерів за раз. Ці вантажні автомобілі можуть бути задіяні для перевезень на порівняно невеликі відстані і бути особливо корисними для реалізації «останньої милі» доставлення [197].

Контейнерні перевезення являють собою складну і динамічну сферу, що потребує високого рівня координації та планування. Застосування передових програмних систем і спеціалізованого транспортного обладнання дає змогу судноплавним компаніям оптимізувати свої операції та забезпечити своєчасне та ефективне доставлення контейнерів до кінцевого пункту призначення.

Можливість відправлення неповних контейнерних поїздів є важливим аспектом логістики контейнерних перевезень. Судноплавні компанії прагнуть мінімізувати затримки в доставленні контейнерів до порту, оскільки такі затримки можуть призвести до додаткових витрат і потенційних штрафів. Одним із підходів для вирішення цієї проблеми є відправлення неповних контейнерних поїздів, щоб своєчасно доставити вантажі в порт, без очікування повного формування складу.

Рішення про відправлення неповного контейнерного поїзда залежить від низки факторів, зокрема обсягу контейнерів, що потребують перевезення, відстані до порту і наявності транспортних ресурсів. У деяких випадках доцільно дочекатися

повного формування складу перед відправленням, особливо за невеликої відстані до порту і легкої доступності транспортних засобів.

Ситуації, за яких час відіграє вирішальну роль, а затримки призводять до додаткових витрат, можуть зумовити необхідність відправлення неповноскладеного контейнерного поїзда як найдоцільніше рішення. Такий підхід забезпечує своєчасне доставлення контейнерів до порту, навіть якщо на момент відправлення не всі контейнери будуть зібрані. У певних випадках судноплавні компанії можуть також визначити пріоритетність окремих контейнерів або вантажів, які є особливо чутливими до часу або цінними, з метою мінімізації впливу затримок на їхню діяльність.

Інтермодальні оператори зазвичай мають можливість формувати контейнерні поїзди одразу на декількох термінальних станціях (рисунок 7.6), адже джерела зародження контейнеропотоків розосереджені по всій країні, тому що Україна має багато крупних промислових центрів та аграрних районів.

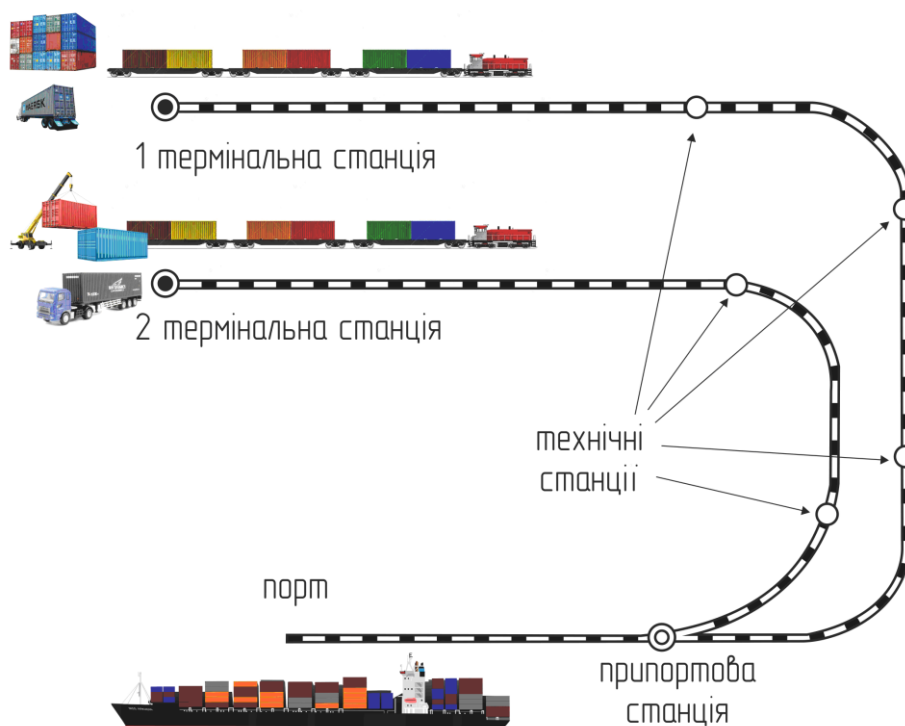


Рисунок 7.6 – Схема транспортування контейнерних партій, що одночасно накопичуються на двох термінальних станціях, до порту з використанням прямих контейнерних поїздів

Ці термінальні станції переважно є територіально віддаленими, але формують поїзди зазвичай в один і той самий порт, із яким працює оператор.

Такий стан справ дає потенційну можливість поєднання управління процесами формування на цих термінальних станціях з метою підвищення надійності сухопутної ланки інтермодального ланцюга [198, 199].

Таке управління дасть можливість адаптивно і гнучко управляти доставленням контейнерів до порту і максимально підвищити надійність своєчасного надходження контейнерів і в необхідній кількості для заповнення всіх зафрахтованих контейнеро-місць на судні-контейнеровозі. Цього можна досягти завдяки, наприклад, пришвидшенню формування контейнерних партій і відправленню неповносоставних поїздів. Такий підхід є виправданим у випадку, коли, наприклад, дві станції формують поїзди в бік одного порту і сумарно вже накопичених (або таких, що будуть накопичені на певні моменти часу) контейнерів вистачить (або майже вистачить) для заповнення всіх зафрахтованих контейнеро-місць на судні. Однак якщо чекати формування повносоставних поїздів, то може значно зрости імовірність їх несвоечасного прибуття.

До того ж контейнерні поїзди, хоча й відправляють прямими маршрутними відправками, але ці поїзди на своєму шляху можуть проходити значну кількість ТС і там витратити значну, і тим більше непередбачувану, кількість часу, простоюючи в очікуванні технічних операцій, у тому числі і зміни локомотива, якого може певний час не бути в наявності. Така ситуація склалася завдяки тому, що на транспортному ринку України відсутні оператори такого класу, як MSC, A.P. Moller-Maersk Group, CMA CGM Group або COSCO Group. Ці компанії оперують надпотужними контейнеропотоками і завдяки цьому здатні забезпечити швидке залізничне сполучення між терміналами та портами, вводячи човникові контейнерні експрес-поїзди (англ. shuttle trains) [200] і викупивши відповідну кількість ниток ГРП у залізничної компанії. До речі, в Україні поки що відсутня можливість придбання ниток графіка і застосування приватного тягового рухомого складу на залізничній мережі загального доступу.

Загалом дієвість відправлення неповних контейнерних потягів залежатиме від специфічних обставин кожної транспортної операції. Хоча такий підхід може бути ефективною стратегією для мінімізації затримок і уникнення штрафів, він не завжди може виявитися найбільш практичним або ефективним, особливо в ситуаціях, коли транспортні ресурси обмежені або відстань до порту значна. Урешті-решт компанії-оператори мають ретельно зважувати компроміси між витратами на затримку і транспортними витратами з ухваленням рішень про способи збирання і транспортування контейнерних потягів.

Отже, постає завдання побудови оптимізаційної моделі управління процесом формування контейнерних поїздів. За основу оптимізаційна модель має містити цільову функцію, яка є певним критерієм оптимізації. За такий критерій доцільно брати вартісний фактор, адже всі уявні складові моделі вимірювані у вартісному вираженні: експлуатаційні витрати, штрафи, ризики тощо.

Одним із найважливіших факторів для управління вагонопотоками і управління контейнеропотоками є витрати, пов'язані з їх простоем.

Отже, основним фактором у структурі цільової функції мають бути витрати, пов'язані з простоем контейнерів на термінальних станціях для формування маршрутних контейнерних поїздів. Зокрема, якщо кількість контейнерів, що надходять на станцію, є визначеним інтегралом від функції інтенсивності, то функція залежності витрат контейнеро-годин від часу в процесі накопичення контейнерної партії може бути подана як інтеграл від добутку функції інтенсивності та змінної часу:

$$B = \int_{\tau_0}^{\tau} \lambda^*(t)(\tau - t)dt, \quad (7.5)$$

де λ^* – функція умовної інтенсивності [201] нестационарного випадкового потоку контейнерів, що надходять до залізничної термінальної станції; τ_0 – момент часу початку розрахункового (планового) періоду; τ – змінний момент часу

завершення накопичення контейнерної партії; t – поточний час як абстрактна змінна величина.

Умовна інтенсивність (англ. conditional intensity function) – це термін теорії точкових процесів [202]. Зазвичай його використовують, коли поточна інтенсивність фактично є ймовірнісною величиною, майбутнє значення якої залежить від історії процесу. Функція умовної інтенсивності є дуже схожою з функцією небезпеки випадкового процесу (англ. hazard function). У такому випадку використано цей термін, по-перше, тому, що ми і оперуємо майбутніми (прогнозними) значеннями цієї функції, і сам прогноз цієї функції також має відбуватися на основі історії процесу. По-друге, звичайна функція інтенсивності (англ. intensity function) описує середню частоту, яку можна інтерпретувати як щільність ймовірності [203] виникнення подій точкового процесу в заданий момент часу, це безумовна функція, вона не залежить від попередніх подій у процесі. До того ж зазвичай (але не завжди) цю функцію використовують у рамках теорій, які досліджують стаціонарні однорідні процеси.

Функція умовної інтенсивності, звісно, є ймовірнісною функцією, яка передбачає зміну поточної величини інтенсивності як наслідок випадкових процесів, що фактично має місце і в процесі накопичення контейнерних партій. У будь-якому разі функція умовної інтенсивності є більш загальним поняттям, і саме його доцільно застосовувати для дослідження нестаціонарних випадкових процесів.

Отже, формула (7.5) містить інтеграл зі змінною верхньою межею. Поняття функції умовної інтенсивності застосовано в теорії випадкових процесів, статистиці і теорії точкових процесів. Нестаціонарність потоків надходження контейнерів до станції пояснюється комплексом факторів, таких як режими функціонування підприємств-вантажовідправників, ритмічність їхньої діяльності та роботи транспортних підрозділів, наявність автотранспортних засобів і водіїв для здійснення перевезень, а також дорожні затори. Нестаціонарність випадкових потоків характеризується мінливістю в часі їхніх характеристик, насамперед інтенсивності.

На відміну від звичайної функції інтенсивності, яка описує швидкість настання подій у певній точці або часовому інтервалі, функція умовної інтенсивності враховує попередню історію та події, що передують заданому моменту часу. Вона визначає ймовірність настання події в зазначений момент або часовий проміжок за умови наявної передісторії та подій. Отже, функція умовної інтенсивності дає інформацію про ймовірність настання події з урахуванням подій, що вже відбулися, і контексту, у якому вони відбуваються. Для стаціонарного випадкового потоку інтенсивність є не лише безумовною, але й постійною величиною.

Висунута функція умовної інтенсивності характеризує міру інтенсивності надходження контейнерів у нестаціонарному випадковому потоці на залізничну станцію, що слугує для формування контейнерного поїзда. Ця функція визначає ймовірність появи нового контейнера в певний момент або часовий інтервал, ураховуючи наявний склад потяга, що формується, і фактори, що впливають на процес накопичення та відправлення контейнерів. Отже, функція умовної інтенсивності дає змогу оцінити динаміку надходження контейнерів на станцію з урахуванням процесу формування поїзда та впливу зовнішніх факторів.

За термінологією теорії точкових процесів, функція умовної інтенсивності є функцією, яка відображує залежність інтенсивності нестаціонарного випадкового процесу від часу. Ця функція враховує залежність імовірності настання наступних подій потоку від подій, які відбувалися в минулому, тобто безпосередньо залежить від історичних даних процесу. Крім того, функція умовної інтенсивності фактично є функцією ризику.

Часовий точковий процес (англ. Temporary Point Process, TPP) [204] можна розглядати як розподіл імовірностей над послідовністю подій змінної довжини в безперервному часі, а також як модель авторегресії. Водночас часовий точковий процес є лічильним процесом, тобто процесом підрахування кількості випадкових подій. Функція умовної інтенсивності дає змогу поєднувати ці підходи і моделювати точкові процеси різної природи та відповідної поведінки.

Для вирішення поставленого завдання пропонується отримувати функції умовної інтенсивності шляхом генерації з використанням прогнозної моделі на основі НМ, щоб урахувати історичні дані. Крім того, функція умовної інтенсивності часового точкового процесу є тотожною функції інтенсивності випадкового потоку в термінології теорії випадкових потоків, яка більш поширена в науковому та освітньому середовищі країн Східної Європи та країн пострадянського простору. Проте теорія точкових процесів є більш загальною та загальновизнаною у світовій науковій спільноті.

Тоді першу складову експлуатаційних витрат можна записати як

$$C_1 = c^{\kappa_2} \sum_{i=1}^{N^{mer}} \int_{\tau_0}^{t_i} \lambda_i^*(t)(t_i - t) dt, \quad (7.6)$$

де N^{mer} – кількість термінальних станцій формування контейнерних поїздів;

c^{κ_2} – вартість контейнерогодини простою (ураховуючи перебування на майданчику залізничної станції);

$\lambda_i^*(t)$ – функція умовної інтенсивності нестационарного випадкового потоку надходження контейнерів до i -ї термінальної станції;

t_i – змінна, що є моментом часу завершення процесу накопичення контейнерної партії на i -й термінальній станції;

t – абстрактна змінна поточного часу.

Крім того, необхідно врахувати додаткові витрати, пов'язані з неповною укомплектованістю маршрутних контейнерних поїздів. Ураховуючи, що до цільової функції недоцільно включати елементи, незалежні від керованих або вільних змінних моделі, такі як витрати на просування контейнерних поїздів, які будуть реалізовані незалежно від їх відправлення, слід зосередитися на необхідності врахування додаткових витрат у разі відправлення неуккомплектованих поїздів. Це пов'язано з тим, що собівартість транспортування партії контейнерів у такому випадку збільшується, відповідно зростає питома собівартість перевезення

контейнера для залізничної компанії. Така ситуація зумовлена тим, що з відправленням неуккомплектованого контейнерного поїзда витрати на його підготовку, відправлення та просування практично не змінюються, однак частина вагоно- або контейнеро-місць у поїзді фактично не буде оплачена клієнтами. Тож додаткові витрати виникають у розмірі вартості перевезення контейнерів у кількості, що дорівнює різниці між нормативною та фактичною кількістю у складі поїзда:

$$C_2 = \sum_{i=1}^{N^{мер}} \left(\left(m_i - \int_{\tau_0}^{t_i} \lambda_i^*(t) dt \right) \left(m_i > \int_{\tau_0}^{t_i} \lambda_i^*(t) dt \right) \frac{C_i^{kn}}{m_i} \right), \quad (7.7)$$

де m_i – норма кількості фітінгових платформ і відповідної кількості контейнерів у перерахунку на сорокафутові контейнери (FEU) у складі контейнерного поїзда, сформованого на i -й термінальній станції;

C_i^{kn} – вартість просування контейнерного поїзда, що відповідає нормативній кількості вагонів, від i -ї термінальної станції до порту.

Як було зазначено вище, контейнерні перевезення, особливо інтермодальні, у яких одночасно беруть участь декілька незалежних транспортних операторів і компаній, пов'язані з ризиком.

Слід зазначити, що відправлення контейнерного поїзда з кількістю вагонів, яка перевищує встановлену норму, може бути економічно обґрунтованим, оскільки доставлення неповної партії контейнерів може спричинити накладення штрафних санкцій. Існує, однак, гранична межа кількості контейнерів і відповідної кількості фітінгових платформ, визначена максимальною допустимою довжиною колій на проміжних станціях, максимальною вагою поїзда, обумовленою потужністю локомотива тощо. Отже, склад контейнерного поїзда може перевищувати нормативне значення кількості вагонів, проте знаходитись у межах граничних показників. У такому випадку можуть виникати додаткові витрати, пов'язані з необхідністю проведення додаткових маневрових робіт під час формування поїзда.

Основні додаткові витрати зазвичай виникають у процесі розвантаження поїзда в порту, оскільки колії припортової станції, розраховані на довгосоставні поїзди, можуть бути зайняті іншими складами. Крім того, колії безпосередньо в порту біля причалів зазвичай не пристосовані для довгих поїздів, тому доведеться здійснювати їх розчеплення з послідовним подаванням частин на портову колію для розвантаження. Ці додаткові витрати необхідно враховувати з плануванням перевезень:

$$C_3 = c^{\partial\theta} \sum_{i=1}^{N^{mep}} \left(\left(\int_{\tau_0}^{t_i} \lambda_i^*(t) dt - m_i \right) \left(\int_{\tau_0}^{t_i} \lambda_i^*(t) dt > m_i \right) \right), \quad (7.8)$$

де $c^{\partial\theta}$ – питомі додаткові витрати, що припадають на кожен вагон, причеплений до контейнерного поїзда поза нормою кількості вагонів.

Як було зазначено вище, якщо фактична кількість поданих контейнерів виявиться меншою за заявлену оператором для завантаження на контейнеровоз, можуть бути застосовані штрафні санкції. Такі види штрафних санкцій останнім часом впроваджують переважно морські перевізники, що обумовлено їхнім небажанням втрачати прибутки та відповідним стимулюванням інтермодальних операторів до запобігання порожньому пробігу контейнеро-місць, особливо на тлі кардинального підвищення тарифів на контейнерні перевезення у світі. Так, всесвітньо відомий морський перевізник - компанія MSC (англ. Mediterranean Shipping Company) запровадила штраф за неподання контейнера до перевезення «no show bookings surcharge», який становить 600 дол. за 1 FEU [205]. Отже, необхідно включити до цільової функції елемент, який враховуватиме ці витрати:

$$C_4 = c^{un} \left(n^{fp} - \sum_{i=1}^{N^{mep}} \int_{\tau_0}^{t_i} \lambda_i^*(t) dt \right), \quad (7.9)$$

де n^{fp} – кількість контейнеро-місць, зафрахтованих оператором на контейнеровозі в перерахунку на FEU; c^{un} – сума штрафу за один FEU, що не був поданий для навантаження на судно.

Відповідно до положень, окреслених у першому розділі, термін «ризик», використовуваний у технічній, економічній і фінансовій галузях, передбачає можливість не лише якісного, а й кількісного оцінювання. Чисельне значення ризику зазвичай виражено у грошовому еквіваленті та може бути обчислене шляхом множення ймовірності виникнення небажаної події на величину матеріальних збитків, породжених наслідками цієї події:

$$C_5 = R = Q \cdot c^{36}, \quad (7.10)$$

де Q – ймовірність настання небажаної події; c^{36} – величина матеріального або фінансового збитку.

Абстрактне формулювання процесу організації формування та доставлення контейнерних партій до портових терміналів передбачає ймовірність несвоєчасного прибуття хоча б одного з контейнерних поїздів, що може спричинити затримку судна та накладання відповідних штрафних санкцій портовою адміністрацією. Ця ймовірність несвоєчасного прибуття контейнерних поїздів обумовлена впливом низки факторів, значна частина яких перебуває поза межами повного контролю залізничного оператора або піддається його лише частковому регулюванню, не забезпечуючи повного виключення можливості настання певної небажаної події. Крім того, ймовірність запізнення контейнерного поїзда безпосередньо залежить від управлінських рішень, пов'язаних із процесом накопичення контейнерних партій на термінальних залізничних станціях. Тривалість проходження поїзда від термінальної станції до порту має бути узгоджена з часовим інтервалом між завершенням накопичення контейнерної партії та моментом відправлення судна, включаючи також час вантажно-розвантажувальних операцій. За умови організації перевезень у складі маршрутних поїздів доцільно розглядати час доставлення як відносно

стабільну величину, що залежить від довжини маршруту або ж моделювати її як випадкову змінну з незначними коливаннями, використовуючи нормальний закон розподілу, що, однак, може бути реалізовано лише в умовах високорозвиненої залізничної інфраструктури, наприклад х перевезенням контейнерів за технологією «shuttle train», коли вантажний рух відокремлено від пасажирського.

У контексті залізничної інфраструктури України вантажні та пасажирські перевезення здійснюють із використанням спільної мережі, при цьому пасажирським потягам надано вищий пріоритет. Така комбінована експлуатація разом із високим навантаженням на залізничні лінії призводить до прискореного зношування колії та елементів верхньої будови, що зумовлює необхідність регулярного планування та позапланового ремонту. Довжина ділянок, на яких запроваджено обмеження швидкості руху, пов'язані зі станом колій або проведенням ремонтних робіт, у середньому становить значну частку загальної протяжності залізничної системи України. Крім того, рух великої кількості вантажних поїздів здійснюється за готовністю і згідно з диспетчерським розкладом, а не за сталим графіком. Одним із найбільш дестабілізуючих факторів, що спричиняє істотні затримки в просуванні контейнерних поїздів, є ситуація на припортових станціях. На цих станціях зазвичай спостерігають скупчення великої кількості составів через нестачу магістральної та маневрової тяги, локомотивних бригад, невідповідність колійного розвитку сучасним обсягам руху, сезонні піки навантаження тощо. Це може призводити до багатогодинних затримок у просуванні контейнерних поїздів від припортової станції до порту. Крім того, така організація процесу накопичення контейнерних партій і формування контейнерних поїздів призводить до того, що витрати залізничних підприємств на початкові і кінцеві операції значно зростають [206].

Попередні дослідження підтвердили, що часовий проміжок зазвичай узгоджений із розподілом Ерланга [207]. Використання саме цього закону розподілу є доцільним для моделювання тривалості транспортування контейнерного поїзда від термінальної залізничної станції до порту як випадкової величини неперервного типу. Затримка поїзда відбуватиметься у випадку, коли час його руху між

термінальною станцією та портом перевищує часовий інтервал між завершенням формування партії контейнерів і граничним моментом початку навантаження цієї партії на контейнеровоз з урахуванням планової дати його відходу. Імовірність несвоечасного прибуття поїзда є комплементарною відносно ймовірності його вчасного прибуття, що дає змогу обчислити її так:

$$Q\{\tau^{np} > (T^c - \tau^{нав} - t)\} = 1 - P\{\tau^{np} \leq (T^c - \tau^{нав} - t)\} = 1 - F(T^c - \tau^{нав} - t; k, \lambda), (7.11)$$

де τ^{np} - тривалість просування контейнерного поїзда як випадкова величина; $\tau^{нав}$ - тривалість навантаження контейнерів на судно-контейнеровоз, яка залежить від обсягу контейнерної партії; t - змінна, що набуває значення моменту часу завершення накопичення контейнерної партії; T^c - момент часу відбуття судна згідно з графіком його руху; $P\{\tau^{np} \leq (T^c - \tau^{нав} - t)\}$ і $Q\{\tau^{np} > (T^c - \tau^{нав} - t)\}$ - імовірність того, що час просування поїзда не перевищить тривалості часового вікна, що обмежене моментом часу закінчення накопичення контейнерної партії та моментом часу відправлення контейнеровоза згідно з його розкладом з урахуванням часу на навантаження, тобто ймовірність вчасного прибуття поїзда до порту і відповідно його запізнення як функція від t ; $F(T^c - \tau^{нав} - t; k, \lambda)$ - кумулятивна функція розподілу закону Ерланга (англ. Cumulative Distribution Function, CDF) [208], де k і λ - параметри розподілу Ерланга.

Отже, імовірність затримки судна-контейнеровоза через запізнення прибуття контейнерного поїзда до порту можна визначити так:

$$Q\{\tau^{np} > (T^c - \tau^{нав} - t)\} = 1 - \frac{\gamma(\lambda \cdot (T^c - \tau^{нав} - t))}{\Gamma(k)} = 1 - \frac{\gamma(\lambda \cdot (T^c - \tau^{нав} - t))}{(k-1)!} =$$

$$1 - \left(1 - \sum_{j=1}^k \frac{e^{-\lambda \cdot (T^c - \tau^{нав} - t)} (\lambda \cdot (T^c - \tau^{нав} - t))^j}{j!} \right) = \sum_{j=1}^k \frac{e^{-\lambda \cdot (T^c - \tau^{нав} - t)} (\lambda \cdot (T^c - \tau^{нав} - t))^j}{j!}, (7.12)$$

де $\gamma(\dots)$ – нижня неповна гамма-функція.

Перехід від гамма-функції $\Gamma(k)$ до факторіала $(k-1)!$ був здійснений завдяки тому, що $k \in \mathbb{N}^+$, тобто параметр k належить до множини додатних цілих чисел. На рисунку 7.7 наведений механізм визначення ймовірності запізнення контейнерного поїзда в разі розподілу величини тривалості часу перевезення за законом Ерланга за допомогою кумулятивної функції розподілу цього закону.

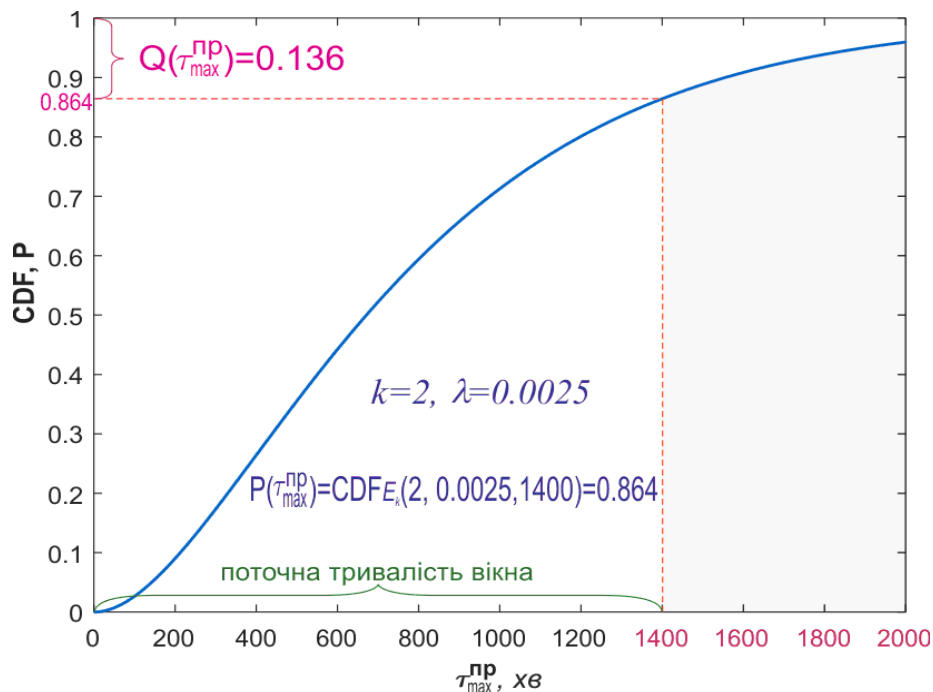


Рисунок 7.7 – Принцип розрахунку ймовірності запізнення прибуття до порту контейнерного поїзда у випадку розподілу величини тривалості перевезення за законом Ерланга за допомогою кумулятивної функції розподілу

На рисунку 7.8 продемонстровано схему визначення ймовірностей затримки судна через запізнення контейнерних поїздів, необхідну для обчислення сукупної функції ризику. Фактично штрафна функція має дискретний характер, оскільки затримка, наприклад, на 15 годин від наступної цілої години, все одно призводить до штрафних виплат за цілу годину.

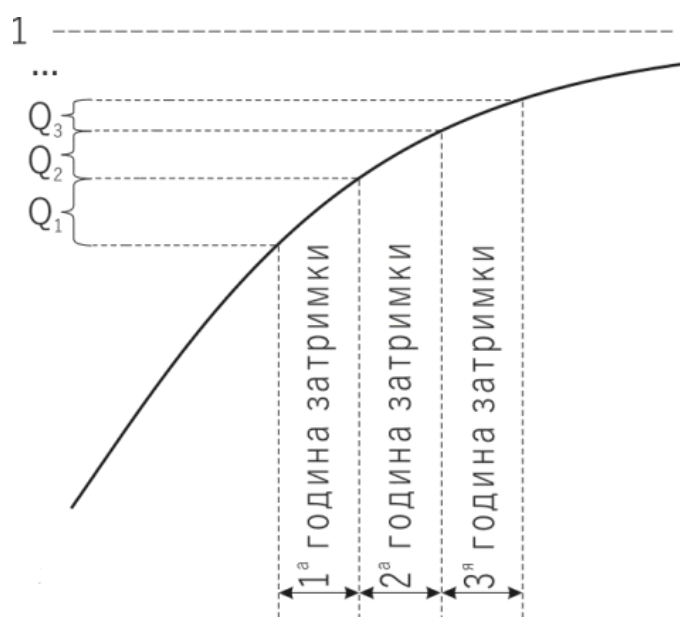


Рисунок 7.8 – Принцип визначення погодинних ймовірностей затримки судна внаслідок запізнень контейнерних поїздів

Однак у разі одночасного накопичення контейнерних партій на декількох термінальних станціях і відправлення маршрутних контейнерних поїздів у напрямку порту ймовірність затримки судна відповідатиме ймовірності події, коли хоча б один із цих поїздів прибуде до порту із запізненням. Беручи до уваги, що запізнення кожного окремого поїзда є незалежною подією, і водночас ці події є сумісними, тобто не виключена можливість їх одночасного виникнення, ймовірність настання випадку, коли принаймні один поїзд прибуде із запізненням, за теоремою про додавання ймовірностей для сумісних подій, дорівнюватиме сумі ймовірностей запізнень кожного окремого поїзда.

Отже, ймовірність затримки судна можна обчислити так:

$$Q^{3c} = 1 - \prod_{i=1}^{N^{mep}} \left(1 - \sum_{j=1}^{k_i} \frac{e^{-\lambda_i \cdot (T^c - \tau^{нав} - t_i)} (\lambda_i \cdot (T^c - \tau^{нав} - t_i))^j}{j!} \right), \quad (7.13)$$

де k_i та λ_i – відповідно параметр ступеня (або форми) і параметр інтенсивності закону розподілу Ерланга, якому підпорядкована величина тривалості маршруту контейнерного поїзда, що прямує від i -ї термінальної станції до порту.

Беручи до уваги наведені обставини, наступну складову цільової функції, яка відображує ризик затримки контейнеровоза через провину залізничного оператора, можна записати так:

$$C_5 = R = Q^{3c} c^{3c} = c^{3c} \left(1 - \prod_{i=1}^{N^{mep}} \left(1 - \sum_{j=1}^{k_i} \frac{e^{-\lambda_i \cdot (T^c - \tau^{нав} - t_i)} (\lambda_i \cdot (T^c - \tau^{нав} - t_i))^j}{j!} \right) \right). \quad (7.14)$$

Отже, цільову функцію можна подати як

$$F(\{t_1, t_2 \dots t_n\}, \{\lambda_1^*(t), \lambda_2^*(t) \dots \lambda_n^*(t)\}, \{\theta_1, \theta_2 \dots \theta_n\}) = \sum_{i=1}^5 C_i, \quad (7.15)$$

де $\{t_1, t_2 \dots t_n\}$ – змінний вектор моментів завершення накопичення контейнерних поїздів; $\{\lambda_1^*(t), \lambda_2^*(t) \dots \lambda_n^*(t)\}$ – множина функцій умовної інтенсивності, що є потоками надходження контейнерів; $\{\theta_1, \theta_2 \dots \theta_n\}$ – множина розподілів величин тривалостей просування контейнерних поїздів (поданих як відповідні параметри) між відповідними термінальними залізничними станціями і портом.

У розгорнутому вигляді цільову функцію можна подати як

$$\begin{aligned}
F\left(\{t_1, t_2 \dots t_n\}, \{\lambda_1^*(t), \lambda_2^*(t) \dots \lambda_n^*(t)\}, \{\theta_1, \theta_2 \dots \theta_n\}\right) = & c^{\kappa z} \sum_{i=1}^{N^{mep}} \int_{\tau_0}^{t_i} \lambda_i^*(t) (t_i - t) dt + \\
& \sum_{i=1}^{N^{mep}} \left(\left(m_i - \int_{\tau_0}^{t_i} \lambda_i^*(t) dt \right) \left(m_i > \int_{\tau_0}^{t_i} \lambda_i^*(t) dt \right) \frac{c_i^{\kappa n}}{m_i} \right) + c^{\partial \delta} \sum_{i=1}^{N^{mep}} \left(\left(\int_{\tau_0}^{t_i} \lambda_i^*(t) dt - m_i \right) \left(\int_{\tau_0}^{t_i} \lambda_i^*(t) dt > m_i \right) \right) + . \quad (7.16) \\
& + c^{uun} \left(n^{\phi p} - \sum_{i=1}^{N^{mep}} \int_{\tau_0}^{t_i} \lambda_i^*(t) dt \right) + c^{3c} \left(1 - \prod_{i=1}^{N^{mep}} \left(1 - \sum_{j=1}^{k_i} \frac{e^{-\lambda_i \cdot (T^c - \tau^{нав} - t_i)} \left(\lambda_i \cdot (T^c - \tau^{нав} - t_i) \right)^j}{j!} \right) \right) \rightarrow \min
\end{aligned}$$

Крім того, слід урахувувати обмеження, накладені на керуючі змінні технологічного процесу. Наприклад, необхідно враховувати обмеження щодо максимальної довжини утворюваних поїздів у фізичних вагонах:

$$\int_{\tau_0}^{t_i} \lambda_i^*(t) dt \leq m_i, \quad i = 1 \dots N^{mep}. \quad (7.17)$$

З метою забезпечення високої надійності та ефективності роботи системи доставлення контейнерних партій до порту слід ввести обмеження на величину максимального ризику, пов'язаного із затримкою судна-контейнеровоза:

$$c^{3c} \left(1 - \prod_{i=1}^{N^{mep}} \left(1 - \sum_{j=1}^{k_i} \frac{e^{-\lambda_i \cdot (T^c - \tau^{нав} - t_i)} \left(\lambda_i \cdot (T^c - \tau^{нав} - t_i) \right)^j}{j!} \right) \right) < R^{\max}, \quad (7.18)$$

де $R^{\max}$ – максимально допустима величина ризику.

Отже, сформовану оптимізаційну модель можна класифікувати як модель нелінійного математичного програмування, адже присутня наявність вектора керуючих змінних, і більшість складових цільової функції і обмежень мають нелінійну природу.

Крім того, слід зазначити, що розроблена модель має у своєму арсеналі можливих рішень не лише рішення про відправлення неповноскладованих поїздів, але

й навпаки, рішення про формування контейнерних поїздів, що містять у своєму складі понаднормову кількість вагонів. Це може бути доцільно за умови необхідності відправлення партії контейнерів відповідної чисельності для закриття всіх або більшості зафрактованих на судні контейнеро-місць, якщо на певній термінальній станції існує достатнє часове вікно для можливості накопичення понаднормової партії контейнерів та вчасного її транспортування до порту, а на іншій термінальній станції, навпаки, низька інтенсивність надходження контейнерів і/або недостатнє часове вікно.

7.4 Проведення моделювання та аналіз результатів

Оптимізація формування контейнерних поїздів є відносно складною задачею нелінійного математичного програмування, що зумовлено цілою низкою факторів.

По-перше, цільова функція та більшість обмежень мають нелінійну природу, що призводить до утворення складного, потенційно багатоекстремального (ураховуючи нелінійні обмеження) простору пошуку оптимального рішення, особливо в умовах суттєвої кількості термінальних станцій. Не менш важливим є динамічний характер процесу управління формуванням поїздів, який потребує врахування значної кількості стохастичних факторів, таких як затримки, зміни обсягів вантажів, розклади суден тощо.

Зважаючи на таку складність, традиційні методи лінійного та нелінійного програмування недостатньо ефективні для вирішення такого завдання. За цих умов застосування ГА є надзвичайно перспективним підходом. ГА демонструють високу здатність до ефективного пошуку в складному, багатовимірному та мультимодальному просторі рішень, що особливо важливо для нелінійних моделей. Вони також дають змогу враховувати змішані типи змінних, включаючи дискретні та безперервні, а також моделювати динамічні процеси з урахуванням стохастичних факторів. Крім того, ГА характеризуються високою обчислювальною ефективністю

і масштабованістю, щою застосовувати їх для вирішення завдань великої розмірності. Отже, використання ГА забезпечує надійний та ефективний математичний апарат для оптимізації складних нелінійних моделей управління формуванням контейнерних поїздів в умовах присутності високого рівня невизначеності.

Базуючись на сформованій моделі, було розроблено програмне забезпечення (фрагмент якого мовою Microsoft C# наведено в додатку Д), що реалізує процедуру оптимізації моделі на основі математичного апарату ГА.

За допомогою розробленої процедури було здійснено моделювання із застосуванням абстрактного полігона і абстрактних даних. У таблиці 7.3 подано вихідні дані для розрахунків.

Таблиця 7.3 – Вихідні дані для моделювання

змінна	значення	од. вим.
1	2	3
Прогнозна умовна інтенсивність $\lambda_1^*(t)$ нестационарного пуассонівського процесу надходження контейнерів (у перерахунку на TEU) до першої термінальної станції	$8.2019 \cdot 10^{-27}t^8 - 4.869 \cdot 10^{-24}t^7 - 4.7899 \cdot 10^{-19}t^6 + 2.519 \cdot 10^{-15}t^5 - 5.0406 \cdot 10^{-12}t^4 + 4.0412 \cdot 10^{-9}t^3 - 7.2505 \cdot 10^{-7}t^2 - 0.0001538t + 0.10832$	FEU/хв
Прогнозна умовна інтенсивність $\lambda_2^*(t)$ нестационарного пуассонівського процесу надходження контейнерів (у перерахунку на TEU) до другої термінальної станції	$5.5929 \cdot 10^{-26}t^8 - 7.8894 \cdot 10^{-22}t^7 + 4.6203 \cdot 10^{-18}t^6 - 1.441 \cdot 10^{-14}t^5 + 2.5387 \cdot 10^{-11}t^4 - 2.4372 \cdot 10^{-8}t^3 + 1.0803 \cdot 10^{-5}t^2 - 0.0012039t + 0.09046$	FEU/хв
Вартість спорядження та просування контейнерного поїзда від першої термінальної станції до порту	4000	дол.
Вартість спорядження та просування контейнерного поїзда від другої термінальної станції до порту	5500	дол.
Параметри форми і масштабу тривалості просування контейнерного поїзда від першої термінальної станції до порту як випадкової величини, розподіленої за законом Ерланга	$k_1 = 2, \mu_1 = 400$	од., хв

Продовження таблиці 7.3

1	2	3
Параметри форми і масштабу тривалості просування контейнерного поїзда від другої термінальної станції до порту як випадкової величини, розподіленої за законом Ерланга	$k_2 = 2, \mu_2 = 500$	од., хв
Додаткові витрати з перевищенням норми кількості фітінгових платформ у складі контейнерного поїзда на одну одиницю (на обох напрямках)	200	дол.
Кількість заброньованих на судні контейнеро-місць у перерахунку на FEU	73	FEU
Момент часу закінчення навантаження судна і його відплиття від моменту початку планового розрахункового періоду	1600	хв
Тривалість навантаження одного контейнера	5	хв/FEU
Штраф за неподання до навантаження на судно 1 FEU	600	дол./FEU
Вартість години затримки судна	5000	дол./год

На рисунку 7.9 наведено графічні зображення функцій умовної інтенсивності випадкових потоків надходження контейнерів до термінальних станцій, наведених у таблиці 7.3.

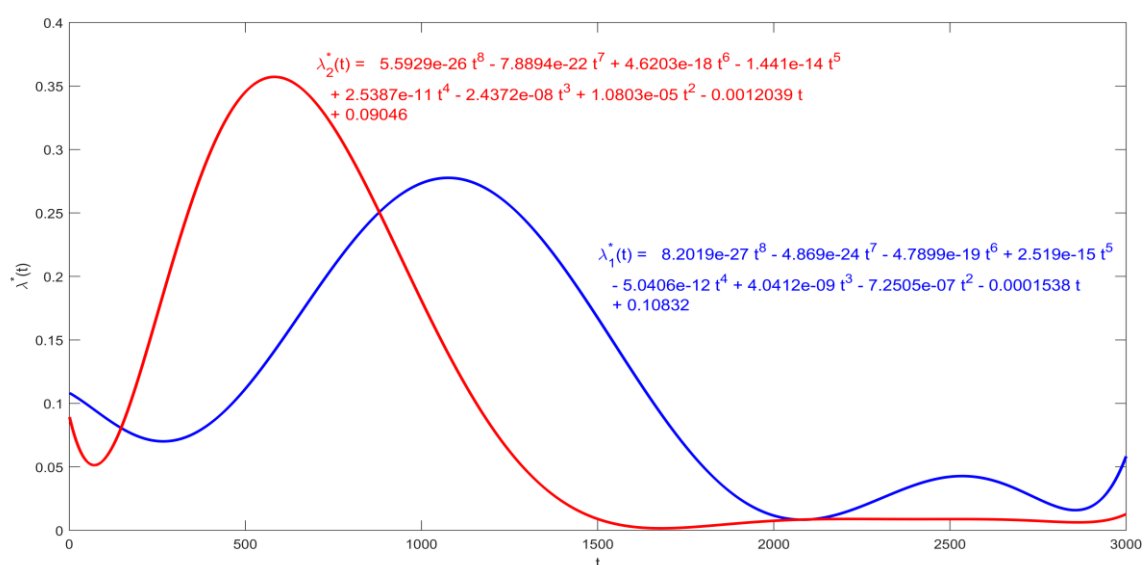


Рисунок 7.9 – Функції умовної інтенсивності випадкових потоків надходження контейнерів

На рисунку 7.10 наведено графічне зображення цільової функції моделі та результат її оптимізації. У випадку двох термінальних станцій цільова функція являє собою поверхню. Однак з більшою кількістю термінальних станцій і відповідно більшою кількістю контейнерних поїздів цільову функцію буде неможливо подати у графічному вигляді та знайти її мінімум методами функціонального аналізу. Тож оптимізацію запропонованої моделі в загальному випадку можна класифікувати як задачу нелінійної оптимізації. Тому розроблена процедура оптимізації запропонованої моделі використовує сучасний математичний апарат ГА.

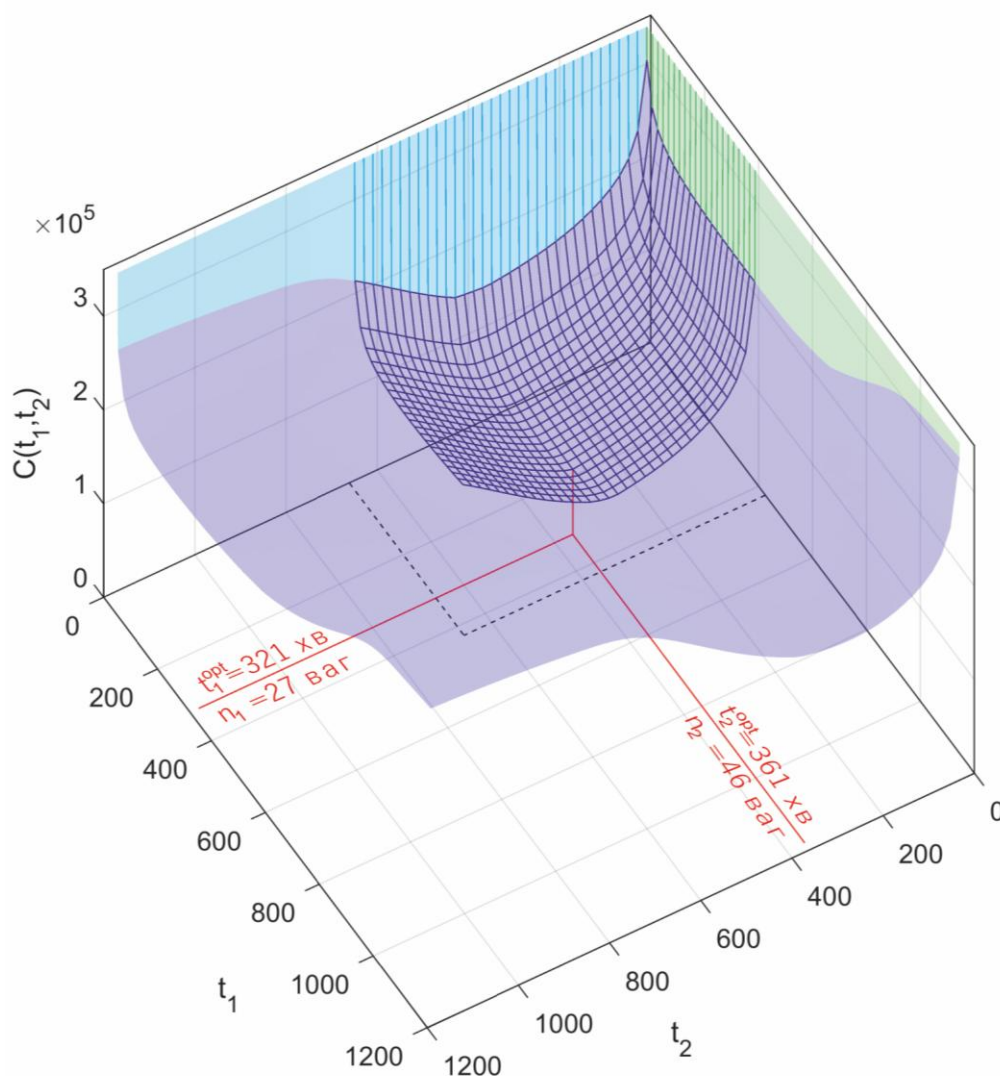


Рисунок 7.10 – Поверхня цільової функції та результат оптимізації моделі

Як видно з наведеного зображення, оптимальні тривалості формування контейнерних поїздів склали 321 хв для першого поїзда і 361 хв для другого поїзда.

Передбачено, що за ці періоди для першого поїзда буде накопичено 27 контейнерів, а для другого - 46 контейнерів. При цьому досягнуто мінімальне значення цільової функції, яке дорівнює 69168,9. Отримане рішення задовольняє встановлені часові обмеження.

Результати проведеного дослідження дають змогу стверджувати, що застосування розробленої оптимізаційної моделі для визначення раціональної тривалості формування контейнерних поїздів сприятиме підвищенню ефективності інтермодальних перевезень. Впровадження цього підходу забезпечує своєчасне доставлення необхідної кількості вантажних контейнерів до портових терміналів, мінімізуючи простой та затримки в накопиченні відправок. Це у свою чергу позитивно позначиться на загальному рівні ритмічності та надійності транспортного обслуговування, що має важливе значення для забезпечення конкурентоспроможності інтермодальних логістичних систем.

Слід зазначити, що розроблена модель характеризується високим рівнем гнучкості та адаптивності, щоб урахувати специфічні умови функціонування конкретних транспортних вузлів, а також динамічні зміни параметрів транспортного процесу. Подальше удосконалення моделі може бути спрямоване на інтеграцію додаткових критеріїв оптимальності, що враховують економічні, екологічні та соціальні аспекти організації інтермодальних перевезень. Це сприятиме всебічній оптимізації логістичних ланцюгів і дасть змогу отримувати комплексні рішення, спрямовані на підвищення сталості та ефективності мультимодальних транспортних систем.

Крім того, розроблена оптимізаційна модель ураховує вплив факторів невизначеності, які є характерними для функціонування інтермодальних транспортних систем. Зокрема, модель дає змогу врахувати ймовірнісні характеристики таких параметрів, як тривалість вантажно-розвантажувальних операцій, час очікування подавання та обробки контейнерних поїздів, затримки в доставленні вантажів тощо. Це забезпечує підвищення адекватності та достовірності отримуваних рішень, що підвищує ефективність і надійність управління процесами інтермодальних перевезень.

На особливу увагу заслуговує можливість застосування розробленої моделі для оптимізації взаємодії залізничного, морського та автомобільного видів транспорту для організації мультимодальних ланцюгів постачання. Урахування невизначеності факторів, що впливають на ефективність такої взаємодії, підвищує стійкість і адаптивність логістичних систем до зовнішніх збурень. Це має важливе значення для забезпечення стабільності транспортного обслуговування та задоволення потреб вантажовласників зі своєчасного доставлення вантажів.

Отже, застосування розробленої оптимізаційної моделі сприяє підвищенню ефективності, надійності та стійкості інтермодальних перевезень, зокрема за рахунок зниження негативного впливу факторів невизначеності та ризику на процеси управління та взаємодії різних видів транспорту. Отримані результати мають важливе практичне значення для вдосконалення логістичних систем, спрямованих на забезпечення сталого розвитку транспортної галузі.

7.5 Висновки до сьомого розділу

Інтермодальні контейнерні перевезення відіграють головну роль у розвитку сучасних глобальних логістичних ланцюгів. Одним із основних елементів цих логістичних систем є залізничний транспорт, який забезпечує ефективне та надійне сухопутне сполучення між континентами і віддаленими регіонами.

Під час аналізу доведено, що залізничний транспорт має низку переваг для організації міжнародних контейнерних перевезень. По-перше, він є найбільш економічно вигідним видом транспорту, особливо для перевезення великих партій вантажів на значні відстані. По-друге, залізниці характеризуються високою вантажопідйомністю і здатністю перевозити масштабні контейнеропотоки. І, нарешті, залізничні перевезення значно екологічніші порівняно з автомобільним чи повітряним транспортом. Отже, залізничний транспорт є особливо цінним для

організації безперебійного та ефективного руху контейнерів через сухопутні ділянки міжнародних логістичних ланцюгів, так звані «сухопутні мости».

З метою подальшого формування підходів для побудови моделей взаємодії залізничного та інших видів транспорту, і в першу чергу морського, у рамках системи інтермодальних контейнерних перевезень проаналізовано природу і параметри контейнеропотоків, що надходять до залізничних термінальних станцій.

Під час аналізу із застосуванням статистичних методів, зокрема методу гістограми, виявлено, що ці потоки є пуасонівськими.

Водночас доведено, що контейнеропотоки на термінальних залізничних станціях мають нестационарний характер, що встановлено за допомогою методу ядерної оцінки щільності потоку (англ. Kernel Density Estimation, KDE) і специфічних статистичних тестів ADF і KPSS. Ця важлива особливість контейнеропотоків створює серйозні труднощі для їх прогнозування та моделювання.

Нестационарність контейнеропотоків є суттєвим джерелом невизначеності в процесі формування контейнерних поїздів. Мінлива інтенсивність прибуття вантажів ускладнює планування ресурсів, оптимізацію технологічних процесів і підвищує ризики зриву графіків доставлення контейнерних партій до порту.

Відсутність стаціонарності в динаміці контейнеропотоків значно знижує ефективність традиційних методів прогнозування та моделювання логістичних процесів на залізничних терміналах. Розроблення нових підходів для управління нестационарними потоками є важливою науковою проблемою для забезпечення стабільності та надійності контейнерних перевезень.

Контейнерні поїзди є основним елементом, що пов'язує віддалені сухопутні райони, що є джерелами зародження контейнеропотоків, з морськими портами в процесі доставлення вантажів. Ці високоефективні залізничні склади рухомого складу дають змогу швидко та надійно перевозити великі обсяги контейнерів між термінальними комплексами і портовими терміналами.

Для вирішення проблеми ефективного управління процесом просування контейнеропотоків сухопутною частиною шляху в рамках системи інтермодальних

контейнерних за допомогою використання залізничного транспорту формалізовано завдання управління процесом формування контейнерних поїздів одночасно на декількох залізничних термінальних станціях, які використовує один оператор. Розроблено оптимізаційну математичну модель, подану як цільова функція і система обмежень. Цільова функція - вартісний критерій, який включає складові, пов'язані з експлуатаційними витратами, а саме витрати, що виникають унаслідок простою контейнерів на термінальній станції під час очікування завершення процесу накопичення контейнерних партій, витрати, пов'язані з відхиленням від норми кількості контейнерів і відповідно фітінгових платформ у складі контейнерних поїздів, ризики, пов'язані з можливою затримкою судна внаслідок запізнення прибуття контейнерної партії до порту в разі транспортування залізничним транспортом, ризики, пов'язані з можливістю незаповнення всіх зафрахтованих на судні контейнеро-місць тощо.

Отже, запропонована модель має розширений функціонал щоб ухвалювати рішення не лише про відправлення неповноскладених поїздів, а і формування контейнерних поїздів із понаднормовою кількістю вагонів. Таке рішення може бути доцільним за умов необхідності відправлення партії контейнерів, достатньої для закриття більшості або всіх зафрахтованих місць на судні, за наявності достатніх часових ресурсів для накопичення такої партії на термінальній станції та низької інтенсивності надходження контейнерів або недостатніх часових ресурсів на іншій термінальній станції.

Для оптимізації розробленої моделі сформовано відповідну процедуру, базовану на використанні сучасного математичного апарату ГА. Така процедура застосована для моделювання на абстрактному полігоні, що налічував дві залізничні термінальні станції.

Аналіз отриманих результатів виявив, що модель дає змогу передбачити оптимальні моменти завершення формування поїздів за рахунок приведення всіх імовірнісних складових до єдиного поля. Включення ризикової складової сприятиме мінімізації ймовірності і обсяг штрафних санкцій для операторів. Оптимізація процесу формування контейнерних поїздів з урахуванням зазначених факторів дає

змогу знизити затримки, підвищити ефективність перевезень і забезпечити своєчасне доставлення вантажів.

З іншого боку, результати моделювання вказують на те, що недотримання оптимальних умов формування контейнерних поїздів для транспортування контейнеризованих вантажів до порту з високим ступенем імовірності призведе до значних додаткових експлуатаційних витрат логістичних операторів під час здійснення інтермодальних перевезень. У той же час ухвалити оптимальне рішення без використання моделі майже неможливо.

Ефективне управління процесом формування контейнерних поїздів дуже важливе для забезпечення своєчасного доставлення вантажів у міжнародному сполученні. Запропонована модель адекватно враховує ймовірнісні складові процесу накопичення та просування контейнерних поїздів до порту.

Отже, ефективність запропонованої моделі обумовлена в першу чергу тим, що можна мінімізувати негативний вплив факторів невизначеності, джерелами яких є як процеси накопичення контейнерних партій, так і процеси їх просування залізничними шляхами в бік порту.

РОЗДІЛ 8

ФОРМУВАННЯ ТЕХНОЛОГІЇ ШВИДКОГО ДОСТАВЛЕННЯ КОНТЕЙНЕРІВ У РАМКАХ СИСТЕМИ ІНТЕРМОДАЛЬНИХ ПЕРЕВЕЗЕНЬ В УМОВАХ НЕВИЗНАЧЕНОСТІ

8.1 Аналіз конкуренції між видами транспорту на ринку транспортних послуг на коротких і середніх дистанціях у контексті інтермодальних міжнародних контейнерних перевезень

У 2021 році міжнародна морська торгівля відновилася приблизно на 3,2 % порівняно з 2020 роком. Обсяги перевезень досягли 11,0 млрд т, що трохи нижче доковідного рівня. Азія залишалася провідним регіоном морських вантажних перевезень. Азіатські порти, як у розвинутих, так і країнах, що розвиваються, обробили близько 4,6 млрд т вантажів, що становить близько 42 % загальносвітового обсягу. У 2021 році порти Азії прийняли близько 7,1 млрд т, що еквівалентно 64 % загального обсягу вивантажених у світі вантажів. У 1970 році більше половини світової морської торгівлі складали наливні вантажі. У 2021 році майже три чверті перевезених вантажів були сухими, включаючи навалювальні та контейнерні. Із загального обсягу міжнародних морських вантажів у 2021 році 8,0 млрд т становили сухі вантажі. Обсяги міжнародних морських перевезень стабільно щорічно зростають приблизно на чверть мільярда тонн навіть попри пандемію, світову політичну нестабільність та інші негативні фактори [209] (рисунок 8.1).

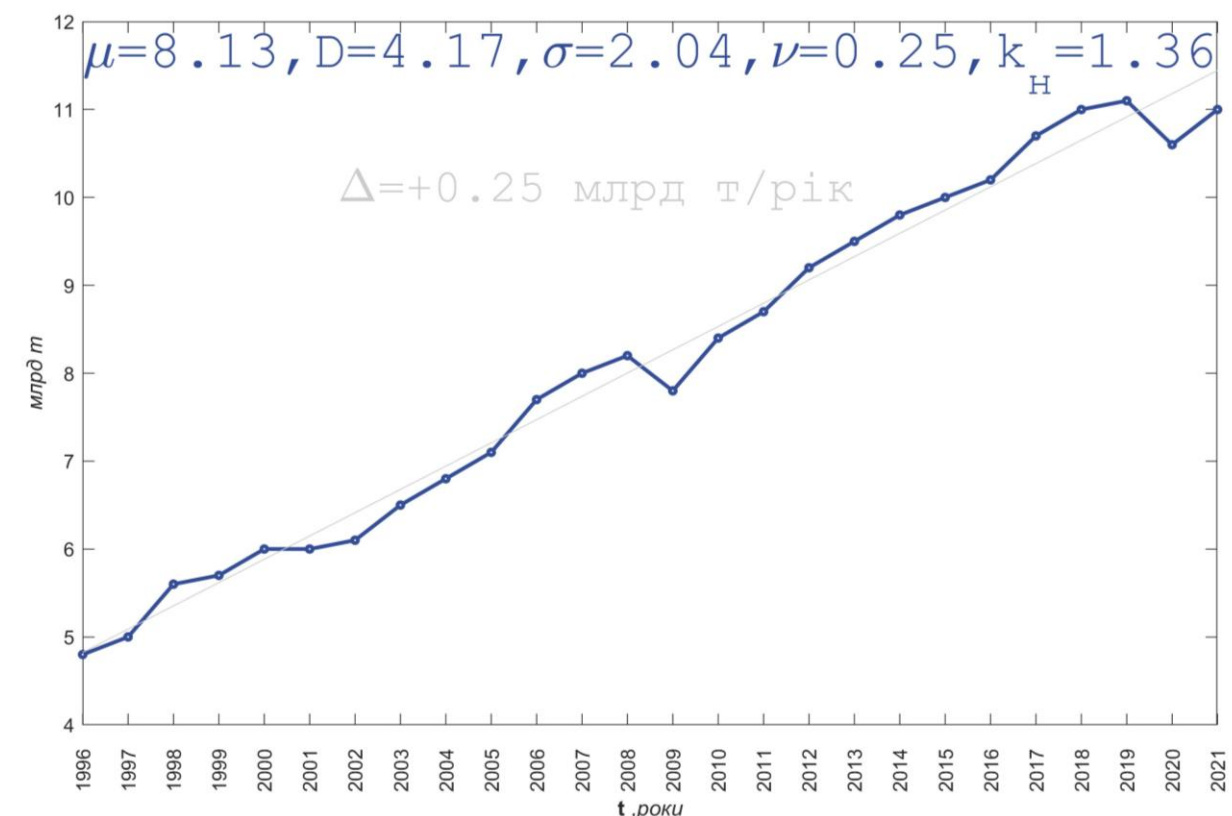


Рисунок 8.1 – Динаміка світових обсягів міжнародних перевезень

Конкуренція між залізничним та автомобільним транспортом є головним аспектом розвитку міжнародних інтермодальних контейнерних перевезень. В умовах глобалізації та зростання торговельних потоків ефективна інтеграція різних видів транспорту стає важливим фактором для підвищення конкурентоспроможності транспортних систем. Особливу увагу слід приділити створенню нових технологій контейнерних залізничних перевезень, спрямованих на підвищення мобільності залізничного транспорту і покращення механізмів взаємодії з портами.

Залізничний транспорт має низку переваг перед автомобільним, включаючи більшу вантажопідйомність, менші викиди вуглекислого газу та нижчі операційні витрати на великі відстані. Проте автомобільний транспорт зберігає свою конкурентоспроможність завдяки високій гнучкості, мобільності та здатності доставляти вантажі «від дверей до дверей». У сфері міжнародних інтермодальних перевезень ці два види транспорту часто працюють у тандемі, створюючи комбіновані транспортні ланцюги, де кожен вид транспорту має свої сильні сторони.

Основні фактори, що визначають конкуренцію між залізничним і автомобільним транспортом, включають вартість перевезень, час доставлення, гнучкість і мобільність. Залізничні перевезення зазвичай дешевші на великі відстані, тоді як автомобільні перевезення можуть бути більш економічними на короткі відстані. Автомобільний транспорт забезпечує швидше доставлення на короткі дистанції, тоді як залізничний транспорт може бути повільнішим через необхідність перевантаження та зміни складів на вузлових станціях. Автомобільний транспорт швидше адаптується до змінних умов і вимог ринку, тоді як залізничний транспорт потребує більш складного планування та логістики.

Для підвищення конкурентоспроможності залізничного транспорту в міжнародних інтермодальних перевезеннях необхідне впровадження нових технологій і покращення взаємодії з портами. Серед перспективних напрямів розвитку можна виділити автоматизацію та цифровізацію, розвиток термінальної інфраструктури, інноваційні рухомі склади та співпрацю з портами. Впровадження систем автоматичного управління рухом поїздів, використання цифрових платформ для моніторингу та управління вантажними потоками, а також застосування технологій блокчейн для відстеження вантажів можуть суттєво підвищити ефективність залізничних перевезень. Покращення контейнерних терміналів і вузлових станцій, оснащення їх сучасними перевантажувальними та складськими потужностями, а також оптимізація логістичних процесів дають змогу скоротити час і витрати на перевантаження контейнерів. Розроблення і впровадження нових типів контейнеровозів, здатних перевозити контейнери на великі відстані з високою швидкістю і низькими витратами, може підвищити привабливість залізничних перевезень. Укріплення взаємодії між залізничними операторами і портами для забезпечення безперебійного перевантаження і транспортування контейнерів включає спільне планування перевезень, обмін даними та координацію логістичних процесів.

Конкуренція між залізничним і автомобільним транспортом у сфері міжнародних інтермодальних контейнерних перевезень є складним і багатогранним процесом. Для підвищення конкурентоспроможності залізничного транспорту

необхідно розвивати нові технології, спрямовані на покращення мобільності та взаємодії з портами. Впровадження автоматизації, цифровізації, інноваційних рухомих складів і покращення термінальної інфраструктури може суттєво підвищити ефективність і привабливість залізничних перевезень, сприяючи їхній інтеграції у глобальні транспортні ланцюги.

На рисунку 8.2 наведені статистичні дані європейської динаміки розподілу роботи з транспортування контейнерів між видами транспорту в рамках систем інтермодальних перевезень [210].

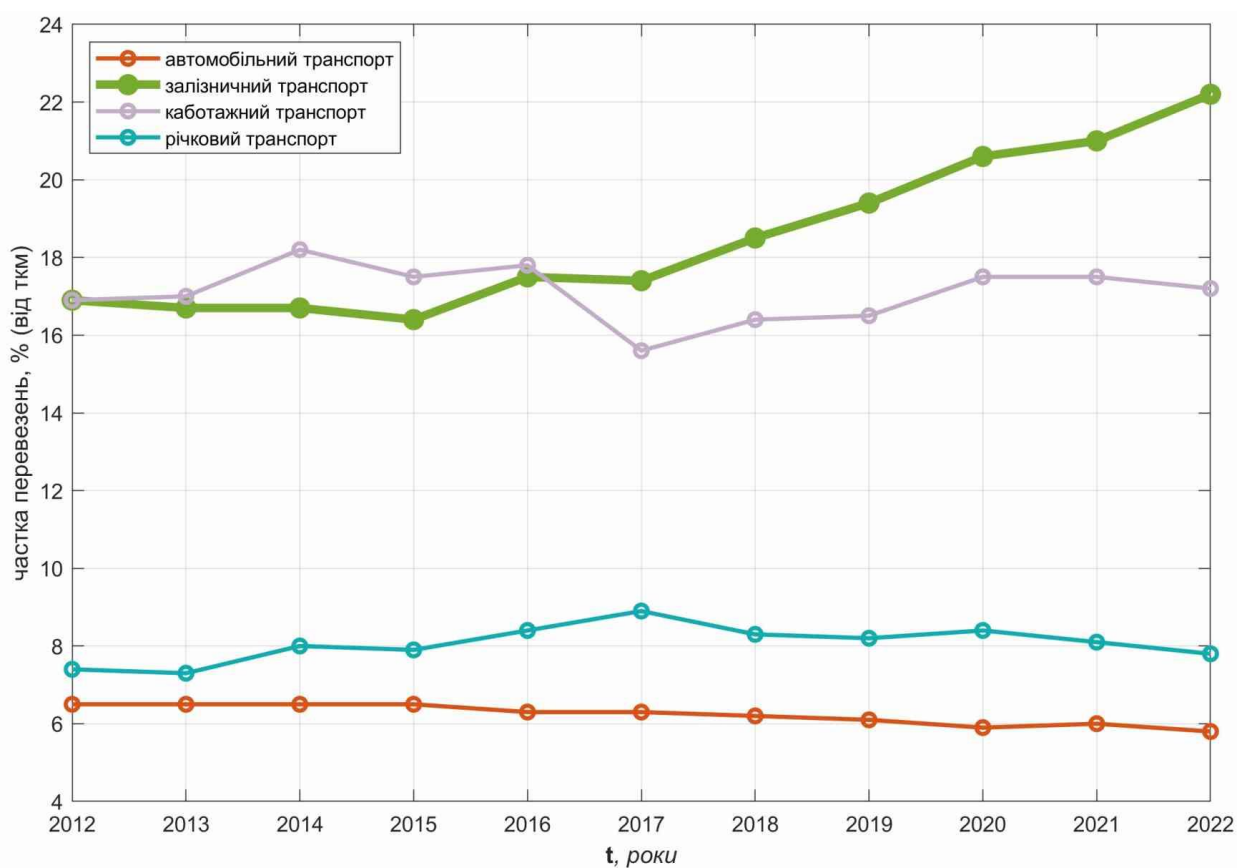


Рисунок 8.2 – Європейська динаміка розподілу роботи з транспортування контейнерів між видами транспорту в рамках систем інтермодальних перевезень поза зоною відповідальності морських перевізників

Такі доволі впевнені позиції залізничного транспорту також обумовлені значними інвестиціями в залізничну інфраструктуру та забезпеченням відкритого

недискримінаційного доступу до неї для приватних операторів і рухомого складу. В Україні і деяких країнах східної Європи ситуація набагато гірша як щодо конкуренції з автомобільним транспортом так і інвестицій, правової підтримки і лібералізації доступу.

Динаміка контейнерних перевезень залізничним і автотранспортом у Європі свідчить про значні зміни у структурі використання цих видів транспорту. Останні роки відзначені зростанням обсягів контейнерних перевезень залізничним транспортом, особливо через порти.

Наприклад, порт Роттердам щотижня обслуговує понад 400 міжнародних контейнерних поїздів, що з'єднують порт із багатьма європейськими країнами. Крім контейнерів, порт пропонує щоденні рейси для перевезення рідких і сипких вантажів. Порт Роттердам планує збільшити обсяг вантажів, що перевозять залізницею, на 50 % протягом наступних десяти років, з 40 до 61 млн т.

Порт Гамбург також демонструє успішні кроки в розвитку залізничних перевезень. Одним з основних факторів успіху стало відкриття доступу до залізничної інфраструктури всім операторам, що підвищило привабливість залізничних перевезень для вантажовідправників. Завдяки цим заходам залізнична частка в перевезеннях контейнерів через порт значно зросла.

Загалом частка залізничного транспорту в контейнерних перевезеннях у Європі зростає завдяки інвестиціям в інфраструктуру, інноваціям і підтримці на рівні держав.

За цими даними, для залізничного транспорту все виглядає начебто дуже добре. Частка його використання зростає, принаймні в Європі (рисунок 8.2), однак ця статистика базована на тонно-кілометровій роботі. Дійсно, на великих відстанях залізничний транспорт привабливіший за автомобільний за контейнерними перевезеннями. До того ж у Європі останніми роками прийнято декілько програм із підтримки залізничних контейнерних перевезень з огляду на більшу екологічність залізничного транспорту і проблеми пропускної спроможності дорожньої інфраструктури. Отже, таким своїм становищем у сфері контейнерних перевезень у

Європі має завдячувати в першу чергу урядовій підтримці та жорстким екологічним вимогам.

Водночас автомобільний транспорт продовжує відігравати важливу роль, особливо на коротких і середніх дистанціях, де він забезпечує більшу гнучкість і швидкість доставлення.

8.2 Аналіз проблем, пов'язаних із трансфером контейнеропотоків між морським і сухопутними видами транспорту

Збільшення обсягів контейнерних перевезень водними, наземними і повітряним шляхами триває безперервно з квітня 1956 року, коли американський бізнесмен Малком Маклін уперше здійснив перевезення партії контейнерів із Ньюарка до Х'юстона на переобладнаному танкері, що започаткувало революційні зміни в міжнародній торгівлі. Інноваційне застосування контейнерів у міжнародних перевезеннях значно скоротило витрати на вантажні операції, а також здешевило імпорتنі товари завдяки зменшенню транспортних витрат. Однак переміщення вантажів у міжнародному сполученні залишається складним і відповідальним завданням, у якому беруть участь морські і наземні види транспорту, зокрема залізничний. Успішність і якість цього процесу залежать від надійності всіх ланок інтермодальної транспортної системи. Найважливішою ланкою, що забезпечує взаємодію між наземними і морськими видами транспорту, зокрема завдяки своєчасному та якісному плануванню і виконанню вантажних операцій, є припортові контейнерні термінали.

З 90-х років XX століття контейнерні термінали морських портів перебувають у процесі постійної модернізації та переобладнання [211]. Проте зі збільшенням кількості сучасного обладнання терміналів стрімко зростають і контейнеропотоки, які вони мають обслуговувати. З 1990 по 2021 рік загальний щорічний контейнеропотік збільшився більш ніж у 10 разів і зараз перевищує 800 млн TEU.

Отже, навіть оснащені новітнім обладнанням, сучасні припортові термінали стикаються з багатьма проблемами, зокрема пов'язаними з використанням великої кількості одиниць автомобільного транспорту як допоміжного засобу перевезення.

За таких обставин раціональним шляхом розвитку інтермодальних перевезень є розроблення та впровадження нових технологій, які сприятимуть обмеженню використання автомобільного транспорту і вирішенню низки пов'язаних із ним проблем - від технічних до екологічних. Проте ключем до вирішення цих проблем є забезпечення рентабельності та конкурентоспроможності залізничних контейнерних перевезень.

Колапс логістичних систем на глобальному рівні, що стався під час пандемії, запустив безліч процесів у транспортній сфері, зокрема інтермодальних перевезеннях. Ці зміни неминуче призведуть до еволюції наявних транспортних технологій у напрямі виняткової гнучкості, різноманітності та інтелектуалізації.

Події 2021 року чітко демонструють, що не тільки світ більше не повернеться до попереднього стану, але й технології інтермодальних перевезень також зазнають змін.

Пандемічний досвід показав, що основною проблемою інтермодальних перевезень став збій, спричинений перевантаженням контейнерних терміналів.

Перевезення від порту до отримувача, попри постійне вдосконалення технологій, залишається найбільш складною частиною маршруту. Зрозуміло, що автоперевізники не можуть повністю вирішити проблему через зростання обсягів інтермодальних перевезень.

Подальший розвиток автомобільних контейнерних перевезень стримується постійним збільшенням обмежень, таких як екологічні норми та обмеження на максимальну вантажопідйомність транспортних засобів. Окрім того, оренда або власність важких автомобілів, здатних перевозити контейнери довжиною 40 або 53 футів, є дорогою. Для перевезення кожного контейнера потрібен не лише окремий ваговоз, але й водій.

Крім того, існує проблема недостатньої пропускної спроможності автодоріг, особливо в припортових зонах, які часто розташовані у великих містах чи

мегаполісах. З іншого боку, залізниця традиційно використовувана для доставлення контейнерів вглиб континенту. Проте і тут є проблеми - використання контейнерних поїздів не усуває потребу в автоперевізниках. Це обумовлено тим, що багато вантажоотримувачів знаходяться далеко від основних залізничних ліній, тому на «останній милі» інтермодального маршруту зазвичай використовують автомобільні перевезення, що потребує додаткових операцій із перевантаження і зберігання.

Отже, автомобільний транспорт має численні недоліки і обмеження для організації інтермодальних перевезень [212]. Водночас залізничний транспорт більш перспективний як для інтермодальних операторів, так і морських портів. Збільшення пропускної спроможності між портом і залізницею дає змогу портам обробляти більше вантажів і відповідно підвищувати прибуток. Для клієнтів залізниця може бути привабливішою порівняно з автомобільним транспортом завдяки таким перевагам, як нижчі тарифи, підвищений рівень безпеки та менша залежність від погодних умов. Проте важливим економічним фактором залишається швидкість доставлення: на коротких і середніх дистанціях залізничний транспорт значно поступається автомобільному.

Проте навіть незначне збільшення строку доставлення, наприклад на добу, може призвести до значних фінансових втрат для підприємств, що обробляють великі партії контейнерів, оскільки це уповільнює обіг їхніх коштів. Значення цього фактора зростає, оскільки в контейнерах зазвичай транспортують дорогі вантажі, і через останні інфляційні процеси їхня вартість постійно зростає.

Застосування залізничного транспорту на коротких і середніх дистанціях сьогодні часто не вигідно, оскільки він поступається автомобільному транспорту у швидкості доставлення. Це пов'язано з тим, що в інтермодальних перевезеннях залізничний транспорт використовує маршрутні контейнерні поїзди або платформи з контейнерами, включені до складу дільничних поїздів. Для таких умов потрібен час на накопичення складів, а з використанням дільничних поїздів – ще і на переформування. Додатково затримки в доставленні контейнерів на причали через переповнені контейнерні площі ще більше уповільнюють процес.

Отже, система інтермодальних перевезень складається з кількох підсистем, які

мають бути добре інтегровані, щоб уникнути вузьких місць у транспортному ланцюзі. Щоб задовольнити попит на контейнерні перевезення, необхідно інвестувати не тільки в нові технічні засоби та інфраструктуру, але і технології оперативного управління.

Щоб мінімізувати або повністю усунути використання автомобільного транспорту в інтермодальних перевезеннях, слід якомога більше наблизити залізничні колії до кінцевих пунктів відправлення чи призначення вантажів. Це вже можливе, оскільки багато великих і середніх підприємств у Європі та США мають власні «під'їзні колії», що з'єднують їх із магістральними залізничними лініями. Тому необхідно розробити транспортну технологію, яка відповідала б технічним вимогам для використання під'їзних колій для доставлення контейнерів від порту «до дверей» вантажоотримувачів і була економічно обґрунтованою.

Інтеграція залізниці та порту є критично важливим стратегічним аспектом розвитку порту, як з економічної, так і з маркетингової точки зору. Деякі порти вже досягли високого рівня інтеграції залізничної та портової інфраструктури завдяки використанню сучасного обладнання, що дає змогу уникнути залучення інших видів транспорту для перевантаження контейнерів із суден на поїзди. Така інтеграція не тільки спрощує організацію роботи порту, але й підвищує шанси залізниці на перехоплення дорогих вантажів в автомобільних перевізників, що є важливим у умовах жорсткої конкуренції на транспортному ринку.

Крім того, ця інтеграція сприяє збільшенню пропускної спроможності сухопутної частини маршруту, що безпосередньо примикає до порту. Цього досягають завдяки усуненню необхідності пересування контейнерів через переповнені міські дороги, що використовують для транспортування контейнерів від причалу до терміналу.

Проте стрімке зростання обсягів контейнерних перевезень ставить під сумнів ефективність такої моделі. Основною проблемою є те, що велика кількість контейнерів потребує великих терміналів, а морські порти вже були одними з найбільших споживачів землі в мегаполісах. Додатково зросла не лише кількість контейнерів, але й кількість учасників процесу, таких як вантажовласники,

вантажоотримувачі, експедитори та інтермодальні оператори.

Очевидно, що першочергові вимоги стосуються рухомого складу. По-перше, довжина колій у вантажних районах може бути обмеженою, здатною приймати лише кілька вагонів. По-друге, більшість цих колій не має електрифікації. Крім того, рухомий склад повинен мати можливість змінювати напрямок і рухатися в обох напрямках по магістральних залізничних лініях на достатньо високій швидкості.

8.3 Вибір технічних засобів для вирішення проблем трансферу та сухопутного доставлення контейнерів

Технічний прогрес не стоїть на місці, досягаючи значних успіхів навіть у таких консервативних галузях, як вантажний залізничний транспорт. Рухомий склад, який відповідає зазначеним вище вимогам, вже існує – це модульні вантажні п'ятивагонні поїзди, вперше побудовані в Німеччині у 90-х роках минулого століття. Ці поїзди належать до класу CargoSprinter [213], названі на честь першого такого поїзда, побудованого в 1996 році німецькою компанією Windhoff GmbH (рисунок 8.3).

Цей поїзд був створений компанією Windhoff GmbH у співпраці з державним оператором вантажних залізничних перевезень DB Cargo та оператором аеропортів Fraport. Компанія Fraport, очевидно, зацікавилася цим поїздом як засобом перевезення невеликих партій авіаконтейнерів. Назва «спринтер» вказує на те, що поїзд призначений для швидкого транспортування вантажів на короткі відстані.

Відносно висока швидкість цього поїзда забезпечена переважно його малою масою. У складі поїздів CargoSprinter нема окремого локомотива, оскільки кожен вагон є моторною платформою. На верхній частині вагона розташована платформа для завантаження контейнерів, а в нижній частині знаходяться дизель-генераторні модулі та/або тягові електродвигуни.



Рисунок 8.3 – Модульний контейнерний поїзд типу CargoSprinter розроблений фірмою Windhoff GmbH

Отже, поїзди CargoSprinter належать до моторвагонного рухомого складу, що забезпечує їхню високу питому потужність, яку визначають як відношення потужності двигунів до маси поїзда. Додаткового зниження ваги досягають завдяки використанню візків Джейкобса для з'єднання безмоторних вагонів між собою. Отже, навіть за з'єднання кількох таких поїздів в один він все одно може рухатися значно швидше за звичайний контейнерний поїзд. Технічні характеристики CargoSprinter дають змогу зчіплювати разом до семи поїздів.

У свій час багатообіцяючий проєкт CargoSprinter зазнав невдачі. Однак це сталося не через його технічні недоліки або технологічну незатребуваність, а через труднощі у виробництві окремих запчастин. Зараз, після більш ніж 20 років, технології значно просунулися вперед. З'явилися нові технології, які можуть зробити ці модульні поїзди ще більш досконалими та економічними. У сучасних умовах їх доцільно зробити електричними, щоб вони живилися від електромережі на магістральних лініях і акумуляторів на під'їзних коліях або коліях вантажних

районів для здійснення вантажних операцій. У будь-якому разі вартість ремонту і обслуговування цих поїздів, якщо їх залучити до інтермодальних перевезень, буде незначною, особливо на фоні майже десятикратного зростання тарифів на транспортування контейнерів, яке сталося протягом 2020–2021 років.

Отже, поїзди CargoSprinter дадуть змогу інтермодальним перевізникам наблизитися до клієнтів без використання автомобільного транспорту. Однак, як уже зазначено, для створення синергетичного ефекту важливо максимально інтегрувати залізницю з портом. Оптимальний варіант інтеграції передбачає мінімізацію проміжного зберігання контейнерів і використання додаткових видів інтермодального транспорту, таких як річстакери або рейкові козлові крани. Технічно це завдання складне, проте на ринку існує готове рішення – система MetroCargo [214]. MetroCargo є складною прецизійною електро-механічною комп'ютеризованою системою, призначеною для автоматичного завантаження контейнерних поїздів.

Проект MetroCargo™ розроблений італійською компанією Cemat, лідером у галузі інтермодальних перевезень в Італії. Компанія Cemat є частиною групи Trenitalia, що належить італійським державним залізницям (італ. Ferrovie dello Stato Italiane). Перші розробки системи MetroCargo™ почалися в середині 2000-х років. У 2009 році відбулася перша презентація концепції системи. У 2011 році система MetroCargo™ була вперше впроваджена на терміналі Cemat в італійському місті Рівальта Скрівія. Основною метою створення MetroCargo™ було підвищення ефективності інтермодальних перевезень шляхом автоматизації процесів завантаження та розвантаження контейнерів для скорочення часу обробки контейнерів, зменшення витрат на ручну працю, зниження операційних витрат, а також підвищення загальної безпеки і точності операцій. MetroCargo™ використовує автоматизовані системи для завантаження та розвантаження контейнерів із поїздів. Це включає роботизовані крани та конвеєрні системи, якими управляє спеціальне програмне забезпечення для оптимізації процесів. Система здатна швидко і точно переміщувати контейнери між поїздами та терміналами без потреби у використанні додаткового транспорту, такого як вантажівки або

річстакери.

Основні переваги системи MetroCargo™: можливість обробляти контейнери значно швидше, ніж традиційні методи, завдяки автоматизації процесів зниження потреб у ручній праці та зменшення операційних витрат, зниження ризику людських помилок і підвищення безпеки операцій, зниження викидів парникових газів за рахунок оптимізації процесів перевезення.

Система MetroCargo™ успішно впроваджена на декількох терміналах в Італії, де вона продемонструвала свою ефективність і надійність. Успіх цього проєкту сприяв його подальшому поширенню на інші термінали та порти.

Портовий термінал MetroCargo в Італії, розташований у місті Савона, є прикладом сучасної інтермодальної інфраструктури, яка використовує передові технології для автоматизації перевезень і обробки контейнерів (рисунок 8.4).



Рисунок 8.4 – Термінал MetroCargo, облаштований у порту міста Савона, Італія

Термінал міста Савона знаходиться в регіоні Лігурія на північному заході Італії. Савона є важливим портом на узбережжі Лігурійського моря і одним з основних транспортних вузлів Італії.

Основна мета терміналу MetroCargo в Савоні — підвищення ефективності

обробки контейнерів та інтеграція залізничного і морського транспорту. Це дає змогу зменшити час і витрати на обробку вантажів, а також знизити вплив на навколишнє середовище за рахунок скорочення використання автотранспорту. Термінал обладнаний автоматизованою системою завантаження та розвантаження контейнерів, яка використовує роботизовані крани і конвеєрні системи, щоб швидко і точно переміщувати контейнери з суден на залізничні платформи та навпаки.

Система MetroCargo в Савоні інтегрована з портовою інфраструктурою для мінімізації необхідності у використанні додаткового транспорту і проміжного зберігання контейнерів. Це сприяє зниженню витрат і підвищенню загальної ефективності. Завдяки високому рівню автоматизації та інтеграції термінал дає змогу зменшити викиди парникових газів і споживання енергії. Використання електрифікованих залізничних ліній і мінімізація руху важких вантажівок сприяє збереженню екології. Портовий термінал MetroCargo в Савоні є важливим кроком вперед у галузі інтермодальних перевезень. Використання передових технологій автоматизації і інтеграції залізничного та морського транспорту сприяє підвищенню ефективності, зниженню витрат і зменшенню екологічного впливу. Успіх цього терміналу відкриває нові перспективи для розвитку інтермодальних перевезень у всьому світі.

Технологія MetroCargo передбачає також і залізничні вантажні термінали, які могли б вирішити проблему інтероперабельності для взаємодії української залізничної системи з залізничними системами європейських країн, адже навіть побудова Євроколей далеко вглиб України [215] не здатна вирішити цю проблему повністю.

Отже, майбутнє MetroCargo™ виглядає обнадійливо, оскільки зростає потреба в ефективних і екологічних рішеннях для інтермодальних перевезень по всьому світу. Компанія Cemmat планує розширити використання системи на нові ринки, зокрема в інших країнах Європи, а також Азії та Північній Америці. MetroCargo™ є значним кроком вперед у галузі інтермодальних перевезень, забезпечуючи підвищення ефективності, зниження витрат і підвищення безпеки операцій. Ця інноваційна технологія має потенціал змінити підхід для обробки контейнерів у

портах і на залізничних терміналах, сприяючи розвитку міжнародної торгівлі та зниженню екологічного впливу транспортної галузі.

8.4 Формування технології швидкого доставлення вантажів в рамках системи інтермодальних контейнерних перевезень на основі нових сучасних технічних засобів і підходів для взаємодії між залізничним і морським транспортом

Інтермодальні контейнерні перевезення відіграють головну роль у глобальній логістиці, а подальший успіх їхнього розвитку залежить від можливості забезпечення ефективної взаємодії між різними видами транспорту. Впровадження передових технологій, таких як автоматизована система MetroCargo та високошвидкісні модульні потяги CargoSprinter, може значно підвищити ефективність і надійність цих перевезень. Подальшим логічним кроком є створення технології швидкого доставлення контейнерів, яка об'єднує ці технічні рішення на основі сучасних моделей взаємодії морського та залізничного транспорту.

Термінал MetroCargo забезпечує автоматизоване завантаження та розвантаження контейнерів із морських суден на залізничні платформи і навпаки. Використання роботизованих кранів і конвеєрних систем дає змогу значно знизити час і витрати на обробку вантажів. Система може автоматично ідентифікувати, переміщувати і сортувати контейнери відповідно до заданих маршрутів і розкладів.

Портовий термінал обладнаний спеціальними рейковими коліями, які безпосередньо сполучені з інфраструктурою MetroCargo, для уникнення проміжного зберігання контейнерів і додаткових перевантажувальних операцій, що значно підвищує ефективність і швидкість обробки вантажів.

Модульні потяги CargoSprinter забезпечують швидке перевезення контейнерів від порту до кінцевих пунктів призначення. Завдяки високій питомій потужності та здатності рухатись в обох напрямках ці потяги можуть швидко і ефективно доставляти вантажі на короткі та середні відстані. CargoSprinter може з'єднуватися з

іншими потягами цього класу, утворюючи довгі склади, щоб гнучко реагувати на зміну обсягу вантажів.

Сучасні CargoSprinter можуть бути оснащені електричними двигунами та акумуляторними батареями. Це дає їм змогу житися від електромережі під час руху по магістральних лініях і використовувати батареї для руху по неелектрифікованих під'їзних коліях або під час вантажних операцій. Це рішення забезпечує зниження викидів парникових газів і зменшує залежність від викопного палива.

Впровадження інтегрованої системи управління та моніторингу дає змогу відстежувати місцезнаходження контейнерів у реальному часі, планувати маршрути і управляти логістичними операціями. Ця система може бути пов'язана з інфраструктурою MetroCargo та CargoSprinter, забезпечуючи безперервний потік інформації та оптимізацію процесів.

Для мінімізації використання автомобільного транспорту важливо максимально наблизити залізничні колії до кінцевих пунктів відправлення або призначення вантажів. Використання під'їзних колій, які сполучають підприємства з магістральними залізничними лініями, дає змогу доставляти контейнери безпосередньо «до дверей» вантажоотримувачів.

Мережа українських залізниць за своєю топологією має досить розгалужений характер [216], крім того, ще більш розгалуженою є система під'їзних колій. Під'їзні колії підприємств пов'язані між собою, тож невеликий вантажний поїзд, що складається з локомотива і декількох вагонів (саме такий формат і має поїзд типу CargoSprinter), фактично може проїхати будь-яку відстань навіть не використовуючи магістральні залізничні лінії.

Отже, технологія взаємодії морського і залізничного транспорту з використанням систем MetroCargo та CargoSprinter сприятиме забезпеченню високого рівня автоматизації, ефективності та екологічності інтермодальних перевезень. Впровадження цієї технології значно знизить витрати, підвищить швидкість доставлення та зменшить негативний вплив на навколишнє середовище, що є важливими факторами в умовах сучасної конкуренції на транспортному ринку.

8.5 Формування моделі управління швидкими залізничними контейнерними перевезеннями в умовах невизначеності на основі робастної оптимізації

Розроблення ефективних і сучасних систем інтермодальних перевезень, які інтегрують передові технічні рішення, такі як MetroCargo та CargoSprinter, потребує формалізації запропонованої технології у вигляді математичної моделі.

Математична модель має описувати основні аспекти технології, включаючи часові та вартісні параметри, а також логістичні аспекти. Основним завданням моделювання є визначення залежностей між різними параметрами системи, такими як час завантаження і розвантаження, час транспортування та маршрути поїздів, часи доступності вантажних фронтів, витрати на обробку і зберігання контейнерів, простої рухомого складу тощо. Модель має ув'язувати між собою у просторі і часі всі основні процеси, що відбуваються під час перевезень.

Зокрема, математична модель має враховувати всі етапи процесу перевезення, від завантаження контейнерів на потяг до їх розвантаження в кінцевому пункті призначення. Розрахунок часу транспортування, урахування вартості та логістичних параметрів є основою для подальшого вдосконалення технології та ухвалення обґрунтованих рішень.

Формалізація технології у вигляді математичної моделі має давати можливість не лише здійснювати точні розрахунки, але й оптимізувати процеси, зокрема зменшити загальний час перевезення та витрати, щоб підвищити ефективність і конкурентоспроможність системи інтермодальних перевезень.

Отже, побудова математичної моделі є необхідним етапом у реалізації технології інтермодальних перевезень, щоб детально проаналізувати всі аспекти системи, забезпечити її ефективну роботу і ухвалювати обґрунтовані управлінські рішення.

Базовим елементом оптимізаційної математичної моделі є цільова функція (або набір функцій).

Основним моментом цільової функції моделі є те, яким цільовим критерієм чи набором критеріїв вона є. Модель оптимізації процесу контейнерних перевезень передбачає одночасну оптимізацію цілої низки різних субпроцесів, однак ефективність усіх цих різних субпроцесів може бути оцінена відносно експлуатаційних витрат. Отже, експлуатаційні витрати і доцільно обрати як монокритерій такої цільової функції.

Важливим елементом математичної моделі є вихідні дані, які формують основу для розрахунків і прогнозів. Точність і достовірність цих даних визначають якість моделі і її здатність адекватно відображувати реальні умови. До вихідних даних належать такі параметри системи, як час перевезення, витрати на обробку, і логістичні характеристики. Коректне визначення та актуалізація даних є критичними для забезпечення точності результатів моделювання та ефективності ухвалених рішень.

Основним процесом, навколо якого й побудована ця технологія, є процес просування контейнеропотоку. Отже, основним компонентом початкових даних для моделі є множина контейнерів. Елемент даних, що інкапсулює необхідну для моделювання інформацію про кожен окремий контейнер, доцільно подати як кортеж, що включає такі атрибути: час, коли контейнер стає доступним для завантаження (після розвантаження з контейнеровоза в порту або після доставлення до вантажного району на під'їзній колії); його вага; довжина у футах; ідентифікатор вузла в графі залізничної мережі, що відповідає під'їзній колії вантажоотримувача; час завершення роботи вантажного району під'їзної колії або завершення процесу завантаження на контейнеровоз; час спливання строку доставлення. Під'їзні колії є залізничними шляхами, що обслуговують одне чи кілька підприємств, і з'єднані з загальною мережею залізниць безперервними рейками, будучи власністю залізничних компаній або підприємств. Крім того, дані моделі включають параметри залізничної мережі, зокрема топологію колійних з'єднань, описану графовою структурою, де вершинами є залізничні станції та вантажні райони під'їзних колій, а дугами залізничні перегони між точками розподілу.

Також для кожної дуги необхідно вказати часові «вікна», коли вона вільна

відповідно до ГРП, і в які періоди може бути відправлений модульний контейнерний поїзд. Ці вікна мають бути визначені з урахуванням типу сигналізації на перегонах, такої як «автоблокування» або «напіваавтоблокування». Додатково для вирішення завдання слід ввести інформацію про набір вантажних пунктів. Характеристика кожного пункту має включати дані про його години роботи, середній час завантаження і розвантаження контейнера. У цьому контексті порт також можна розглянути як вантажний пункт.

Для забезпечення практичної застосовності моделі в реальних умовах необхідно врахувати вплив випадкових подій, що постійно супроводжують будь-який транспортний процес. Це особливо важливо для інтермодальних перевезень, де задіяні різні види транспорту, включаючи ті, що функціонують залежно від погодних умов, які можуть бути важко прогнозованими навіть на короткі строки. Відомо, що всі елементи транспортної системи, такі як рухомий склад, інфраструктура, сигнальні та інформаційні пристрої, підлягають впливу випадкових відмов. Затримка прибуття судна, закриття залізничної колії, поломка модульного поїзда – усі ці події можуть ускладнити реалізацію затвердженого плану розвезення контейнерів. Оскільки рідкісні події складно прогнозувати і враховувати зі складанням плану, доцільніше корегувати його в оперативному режимі, виконуючи повторні розрахунки з урахуванням актуальної інформації про стан системи.

Отже, необхідно забезпечити можливість проведення розрахунків не лише з певного початкового стану, але і будь-якого актуального положення системи. Однак існує певна форма невизначеності, яку необхідно враховувати для планування перевезень контейнерів за допомогою модульних поїздів. Ця невизначеність пов'язана з особливостями залізничного технологічного процесу. Поїзди типу CargoSprinter мають високу швидкість, що є їхньою значною перевагою і дає змогу відправляти їх зі станції без суттєвого порушення наявного графіка. Проте час пересування між станціями не є сталою величиною і може змінюватися в певних межах. Навіть за наявності постійної швидкості відправлення поїзда CargoSprinter може затримуватися через необхідність звільнення блоків дільниці, що займає певний час, особливо якщо одночасно відправлено інший поїзд.

При цьому разом із зазначеними факторами важливо враховувати, що час переміщення поїзда CargoSprinter може варіюватися залежно від наявності попереду інших потягів. Якщо на перегоні вже перебуває важкий вантажний або пасажирський поїзд, це може суттєво зменшити швидкість руху модульного поїзда. На одноколійних ділянках може знадобитися дочекатися проходження зустрічного поїзда, що також викликає затримки. Ще одним фактором, що впливає на збільшення часу в дорозі, є обмеження швидкості через ремонтні роботи на перегонах. Проте найбільший вплив на невизначеність планування мають вантажні фронти і під'їзні колії підприємств. Ці об'єкти зазвичай не мають чіткого графіка роботи і можуть бути недоступними через обслуговування інших клієнтів, оскільки одну під'їзну колію можуть використовувати кілька підприємств для зниження витрат.

Отже, постановка завдання набуває певної невизначеності, що ускладнює досягнення якісних управлінських рішень. У разі наявності невизначеності у вихідних даних або змінних задачі її відносять до класу стохастичної оптимізації. Цей клас задач є найменш дослідженим серед усіх оптимізаційних завдань, що робить його предметом значного інтересу для теоретиків. Водночас, ураховуючи, що невизначеність притаманна будь-якому реальному процесу, задачі стохастичної оптимізації мають значний практичний інтерес. Розроблення теорії та методів для їх вирішення є основою підвищення ефективності систем управління в різних сферах виробництва. Задачі цього класу дуже різні, і деякі дослідники вважають, що природа невизначеності має принципове значення для їх вирішення.

Невизначеність може виникати через недостатність інформації або імовірнісну природу певних процесів чи явищ. Традиційний підхід до задач стохастичної оптимізації полягає у використанні статистичної інформації про досліджувані процеси, такі як параметри розподілів, і обробці цієї інформації за допомогою математичних інструментів теорії ймовірностей. Це прийнятно переважно для стратегічних завдань. Натомість сучасні методи для оперативного управління використовують інтервальне подання стохастичних змінних або їх подання у вигляді нечітких множин. Наприклад, тривалість просування модульних поїздів

можна подати як інтервальні числа.

Інтервальні числа є математичним інструментом, використовуваним для подання невизначених величин. Кожне інтервальне число визначено парою чисел: нижньою та верхньою межами, які вказують діапазон можливих значень цієї величини. Іншими словами, інтервальне число $[a,b]$ означає, що реальне значення лежить десь між a і b .

Інтервальні числа дають змогу зручно відображувати невизначеність, пов'язану з величинами, які можуть варіюватися в певному діапазоні. До речі, існують визначені правила для виконання арифметичних операцій з інтервальними числами. На рисунку 8.5 наведено приклад інтерпретації запису інтервального числа $[217]$.

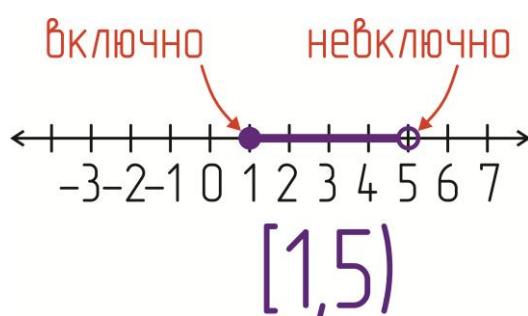


Рисунок 8.5 – Приклад інтерпретації запису інтервального числа $[1,5)$

Інтервальні числа забезпечують потужний спосіб роботи з невизначеністю. Зокрема, вони зручні для подання випадкових величин або змінних, закон розподілу яких є рівномірним або невідомим або взагалі не має значення в контексті вирішуваної задачі, або інших величин або змінних, про які відомі лише межі, у яких вони можуть змінюватися.

Сучасний підхід у стохастичній оптимізації акцентований на отримання надійних рішень. Дослідження показали, що реальні задачі оптимізації можуть бути дуже чутливими до відхилень вихідних даних: навіть невеликі відхилення в розрахункових даних можуть суттєво вплинути на оптимум, що знижує практичну цінність рішення. Щоб подолати цю проблему, розроблено підхід, відомий як

робастна оптимізація [218]. Робастна оптимізація доповнює стохастичне програмування, вирішуючи завдання з неповністю визначеними або «забрудненими» даними [219, 220], забезпечує отримання рішень, які зберігають свою практичну цінність навіть за умов найбільш несприятливих сценаріїв розвитку подій.

Щодо управління модульними поїздами на полігоні для доставлення контейнерів, то може здатися, що найгірший сценарій полягає в тому, коли всі тривалості руху поїздів досягають своїх максимальних значень. Проте в контексті комбінаторної оптимізації це припущення може бути неправильним. Наприклад, якщо один поїзд проходить ділянку за мінімальний час і прибуває до вантажного фронту раніше, ніж інший поїзд, це може дати змогу почати вантажні операції раніше. Проте інший поїзд змушений чекати, що може призвести до затримки його прибуття на іншу під'їзну колію, де є часові обмеження для завершення вантажних операцій. Отже, в умовах комбінаторної оптимізації принцип мінімаксу реалізовано через пошук оптимального рішення, що забезпечує найкращий результат у найгірших сценаріях розвитку подій.

Цільова функція для моделі робастної оптимізації, що відображує витрати на експлуатацію, може бути сформульована так:

$$\begin{aligned}
 F(A, x^A, n, T, \tau', \tau'', t^{sant}) = & \\
 \min_{(x^A, n, T)} & \left\{ \max_{(\tau', \tau'', t^{sant})} \left\{ e_{nk} \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^{|x_i^A|} d \left(s \left(x_{i,j-1}^A, \sum_{k=1}^{j-1} I(x_{i,k}^A = x_{i,j-1}^A) \right), s \left(x_{i,j}^A, \sum_{k=1}^j I(x_{i,k}^A = x_{i,j}^A) \right) \right) \right\} + \right. \\
 & e_{ood} n + e_{nz} \sum_{i=1}^n \left(\bigoplus_{j=1}^{|x_i^A|} (T_i(j=1) + t_{i,j-1}^{sant}(j>1) + t_{i,j-1,j}^{np}, \tau'_{i,j}) \right) + \\
 & \left. + \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^{|x_i^A|} q_{x_{i,j}^A} e_{x_{i,j}^A}^{uu} \cdot I \left(\left(\bigoplus_{j=1}^{|x_i^A|} (T_i \cdot I(j=1) + t_{i,j-1}^{sant} \cdot I(j>1) + t_{i,j-1,j}^{np}, \tau'_{i,j}) \right) > \tau''_{i,j} \right) + \right. \\
 & \left. + e_{кмк} \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^{|x_i^A|} \left(\left(q_i^{\max} - \sum_{l=1}^j q_{x_{i,l}^A} Q \left(\sum_{k=1}^j I(x_{i,k}^A = x_{i,l}^A) \right) \right) d \left(s \left(x_{i,j-1}^A, \sum_{k=1}^{j-1} I(x_{i,k}^A = x_{i,j-1}^A) \right), s \left(x_{i,j}^A, \sum_{k=1}^j I(x_{i,k}^A = x_{i,j}^A) \right) \right) \right) \right\} \right\}
 \end{aligned} \quad , (8.1)$$

де A – множина замовлень на перевезення контейнерів;

x^A – змінна послідовність, яка визначає порядок здійснення операцій з обслуговування замовлень і утворена на основі множини A , містить номери всіх замовлень, кожен із яких зустрічається по два рази, що відповідає операціям завантаження і вивантаження контейнерів відповідно;

n – змінна поточна кількість модульних поїздів, які розглядають як виконавців замовлень;

T – змінний вектор моментів часу початку виконання замовлень на перевезення модульними контейнерними поїздами;

τ', τ'' – множини послідовностей поточних реалізацій інтервальних чисел, які відповідно є моментами часу початку і закінчення роботи вантажних фронтів по маршрутах прямування модульних поїздів;

$t^{вант}$ – множина послідовностей поточних реалізацій інтервальних чисел, які є тривалістю вантажних операцій на вантажних фронтах з обслуговування замовлень по маршрутах кожного з модульних поїздів;

$|x_i^A|$ – довжина (кількість елементів) підпослідовності x_i^A , утворена з послідовності x шляхом видалення всіх елементів, які містять номери замовлень, окрім тих, що призначені до виконання i -м поїздом, ця послідовність визначає порядок всіх операцій, що виконує i -й поїзд, у тому числі визначає його маршрут прямування і порядок завантаження і розвантаження замовлень;

$s(a, b)$ – функція, що повертає номер станції (або вантажного фронту) залежно від аргументів a і b , де a – це номер замовлення, b – це тип операції з ним (1 – завантаження, 2 – розвантаження);

$d(s_1, s_2)$ – функція, що повертає відстань по залізничній мережі між станціями (або вантажними фронтами) s_1 та s_2 ;

$e_{нк}$ – вартість поїздо-кілометра;

$e_{нг}$ – вартість поїздо-години;

$e_{кмк}$ – вартість порожнього пробігу контейнеро-місце-кілометра;

$e_{x_j^A}^{ш}$ – величина штрафу за несвоєчасне подання одного контейнера до

вантажного фронту (або інших збитків) для виконання замовлення, номер якого містить елемент підпослідовності $x_{i,j}^A$;

e_{000} – додаткові витрати, пов’язані з включенням модульного поїзда до плану перевезень (виклик додаткової поїзної бригади, екіпірування, проведення ТО тощо);

$x_{i,j}^A$ – j -й елемент підпослідовності x_i^A , тобто підпослідовності виконання операцій i -м поїздом, який містить номер замовлення, з яким виконують j -ту операцію, тип операції (завантаження або вивантаження) визначено кількістю разів входження номера замовлення в таку підпослідовність до j -го елемента включно, якщо номер зустрічається вперше, це є ознакою операції завантаження, якщо вдруге – це операція вивантаження, але кожна з цих операцій має бути виконана на відповідній до замовлення станції (або вантажному фронті);

$t_{i,j}^{вант}$ – елемент послідовності (яка у свою чергу є елементом множини $t^{вант}$), який містить поточну реалізацію інтервального числа, що являє собою тривалість відповідної j -ї вантажної операції i -го модульного поїзда;

$t_{i,j-1,j}^{np}$ – тривалість просування модульного поїзда між $(j-1)$ -ю та j -ю станціями (або вантажними фронтами) його маршруту;

$q_i^{\max}$ – нормативна (максимальна) контейнеромісткість i -го модульного поїзда;

$q_{x_{i,j}^A}$ – кількість контейнерів замовлення, номер якого містить j -й елемент підпослідовності x_i^A ;

T_i – змінний момент часу початку виконання замовлень на перевезення i -м модульним поїздом;

$\tau'_{i,j}$ – поточна реалізація значення інтервального числа, що є змінним моментом часу початку роботи j -го вантажного фронту на маршруті i -го поїзда;

$\tau''_{i,j}$ – поточна реалізація значення інтервального числа, що є змінним моментом часу закінчення роботи j -го вантажного фронту на маршруті i -го поїзда;

$\bigoplus_{j=1}^{|x_i^A|}(\dots)$ – агрегуюча операція максимуму;

$I(\dots)$ – індикаторна функція, яка повертає значення 1, якщо її операнд набуває

значення «правда», і 0 в іншому випадку;

$Q(\dots)$ – функція визначення напрямку зміни кількості контейнерів у складі поїзда,

$$Q(y) = \begin{cases} 1 & , \text{ якщо } y = 1 \\ -1 & , \text{ якщо } y = 2 \end{cases} \quad (8.2)$$

Отже, аргументом такої функції є тип вантажної операції, прийнятий у рамках цієї моделі: 1 – завантаження, 2 – вивантаження, тож функція визначає, чи слід додати кількість контейнерів, які відповідають певному замовленню, до складу модульного поїзда або, навпаки, відняти цю кількість контейнерів від складу поїзда відповідно до виду вантажної операції.

Перший компонент функції відображує витрати на переміщення поїздів. Другий компонент пов'язаний із додатковими витратами з введенням поїзда до плану перевезень: виклик додаткової поїзної бригади, екіпірування, проведення ТО тощо.

Третій компонент охоплює витрати, що виникають через час, витрачений на проведення перевезень, у тому числі очікування та виконання вантажних операцій.

Тобто витрати, обчислювані за допомогою визначення поїздо-кілометрової роботи, пов'язані з витратами пального на просування поїздів тощо, належать до однієї статті видатків за бухгалтерським обліком, а витрати, що визначають на основі поїздо-годин, пов'язані з заробітною платою локомотивних бригад тощо, належать до іншої статті видатків. Такий підхід фактично реалізує принципи, на яких базований, зокрема, метод витратних ставок.

Четвертий компонент відображує витрати у вигляді штрафів за затримку доставлення контейнерів або інші витрати, пов'язані з несвоєчасним поданням модульного поїзда на вантажний фронт і необхідності, наприклад, продовження тривалості його роботи для виконання вантажних операцій. Для деяких вантажних пунктів ці штрафи можуть бути незначними, тоді як для інших — істотними. Наприклад, несвоєчасне доставлення контейнерів до порту може призвести до затримки судна і виплати штрафу за демередж. Навіть якщо судно не затримано, але його власники або оператори мали право відправити його без очікування

контейнерів, усе ще можуть бути накладені штрафи за резервування перевізних потужностей без наявності вантажів «no show bookings surcharge».

П'ятий компонент включає додаткові витрати, що виникають через пробіг порожніх контейнерів у складі поїзда. Унаслідок пробігу порожніх контейнеро-місць збільшується середня питома собівартість перевезення контейнерів. Тож цей компонент по суті є штрафною функцією, спрямованою на підвищення ефективності використання рухомого складу.

Оптимізацію цієї цільової функції слід проводити з урахуванням технологічних обмежень, характерних для процесу транспортування контейнерів. Перше обмеження зменшує область допустимих рішень, щоб з виконанням вантажних операцій на будь-якому вантажному пункті не допускати перевантаження поїзда більш ніж його максимальна контейнеромісткість:

$$\cdot \sum_{l=1}^j q_{x_{i,l}^A} Q \left(\sum_{k=1}^j I(x_{i,k}^A = x_{i,l}^A) \right) \leq q_i^{\max}, \quad \forall j \in x_i, i = 1..n. \quad (8.3)$$

Друге обмеження необхідне для гарантування, що весь робочий парк модульних поїздів зможе виконати всі заплановані завдання, не перевищуючи часових меж встановленого планового періоду:

$$\bigoplus_{j=1}^{|x_i^A|} \left(T_i(j=1) + t_{i,j-1}^{вант}(j>1) + t_{i,j-1,j}^{np}, \tau'_{i,j} \right) \leq \tau^{zn}, \quad \forall i, i = 1..n, \quad (8.4)$$

де τ^{zn} – часовий горизонт планування.

Третє обмеження потрібне для забезпечення того, щоб кожен модульний поїзд міг здійснити вантажні операції в усіх призначених пунктах маршруту до їх повного закриття:

$$\bigoplus_{j=1}^p \left(T_i(j=1) + t_{i,j-1}^{вант}(j>1) + t_{i,j-1,j}^{np}, \tau'_{i,j} \right) \leq \tau_p^{zfb}, \quad \forall i, \forall p, i = 1..n, p \in x_i^A, \quad (8.5)$$

де $\tau_p^{3\phi}$ – час закінчення роботи p -го вантажного фронту на маршруті i -го поїзда в межах горизонту планування.

Четверте обмеження також забезпечує знаходження досяжного рішення, обмежуючи початок роботи кожного модульного поїзда початком планового періода:

$$T_i \geq \tau^0, \quad \forall i, i = 1..n, \quad (8.6)$$

де τ^0 – момент часу початку планового періоду.

Застосування функцій $\max$ в обмеженнях, які містять змінні, що підлягають впливу невизначеності, зумовлене необхідністю забезпечення робастності цих обмежень.

Отже, повна система обмежень

$$\left\{ \begin{array}{l} \sum_{l=1}^j q_{x_{i,l}^A} Q \left(\sum_{k=1}^j I(x_{i,k}^A = x_{i,l}^A) \right) \leq q_i^{\max}, \quad \forall j \in x_i, i = 1..n \\ \bigoplus_{j=1}^{|x_i^A|} (T_i(j=1) + t_{i,j-1}^{\text{вант}}(j>1) + t_{i,j-1,j}^{np}, \tau'_{i,j}) \leq \tau^{2n}, \quad \forall i, i = 1..n \\ \bigoplus_{j=1}^p (T_i(j=1) + t_{i,j-1}^{\text{вант}}(j>1) + t_{i,j-1,j}^{np}, \tau'_{i,j}) \leq \tau_p^{3\phi}, \quad \forall i, \forall p, i = 1..n, p \in x_i^A \\ T_i \geq \tau^0, \quad \forall i, i = 1..n \end{array} \right. \quad (8.7)$$

Основна керуюча змінна подана як послідовність x^A , до того ж склад елементів цієї послідовності має залишатися незмінним, адже всі замовлення мають бути виконані. Варіювання має відбуватися лише у формі зміни порядку елементів послідовності і відповідно до всіх підпослідовностей, що відповідають порядку здійснення операцій і маршрутам модульних поїздів. Інша керуюча змінна n , що є поточною кількістю модульних поїздів, задіяних за оперативним планом розвезення контейнерів, також є дискретною. Однак наступна керуюча змінна T є вектором, що містить моменти часу початку виконання перевезень кожним модульним поїздом, а отже, вектором змінних безперервного типу. Тож, ураховуючи робастну постановку

задачі, сукупність розробленої цільової функції, що реалізує принцип мінімаксу, та системи обмежені можна класифікувати як математичну модель змішаної комбінаторної робастної оптимізації.

8.6 Моделювання процесу побудови оперативного плану роботи системи швидкого залізничного доставлення контейнерів та аналіз результатів

Подальшим етапом є оптимізація моделі. Слід зазначити, що за останні два десятиріччя досягнуто певних успіхів у вирішенні завдань робастної оптимізації. Наприклад, роботи [219, 220] запропонували методи для трансформування цільової функції та обмеження так, що завдання робастної оптимізації може бути зведено до завдання опуклого програмування. Для вирішення завдання пропонувано спеціально розроблені методи, такі як метод еліпсоїдів. Однак ці підходи є ефективними лише за певних умов, зокрема коли модель має гладку цільову функцію. У контексті розроблення оперативного плану для модульних поїздів ця умова не завжди виконується, оскільки задача належить до класу комбінаторних (дискретних) оптимізацій. Тому для ефективного розв'язання такої прикладної задачі, як і будь-якої складної виробничої задачі в робастній постановці, необхідне розроблення спеціалізованих методів оптимізації, адже фактично кожна окрема задача, навіть чисто комбінаторної оптимізації, але в робастній постановці, потребує розроблення спеціального методу оптимізації [221, 222].

Специфіка цієї задачі, як і багатьох інших прикладних задач, полягає в тому, що абсолютний оптимум цільової функції не є обов'язковим, і достатньо наблизитися до нього з певною точністю [223]. За таких умов доцільно відмовитися від розроблення аналітичних методів і віддати перевагу іншим підходам, зокрема евристичним. Один із основних напрямів серед евристичних методів — ГА. ГА є привабливими кандидатами для вирішення цієї задачі завдяки кільком важливим перевагам. По-перше, вони забезпечують автоматизацію процесу розв'язання

складних задач, навіть із великою розмірністю, завдяки ефективному використанню обчислювальних потужностей. По-друге, ГА не обмежені лише гладкими цільовими функціями, що робить їх прийнятними для задач комбінаторної оптимізації.

Складність планування роботи модульних поїздів у робастній постановці визначена необхідністю одночасної мінімізації і максимізації цільової функції. Для гладких цільових функцій існує метод еліпсоїдів [219], але його застосування може бути обмеженим і залежить від багатьох факторів, зокрема досвіду та кваліфікації дослідника. У випадку задачі дискретної оптимізації, якою є задача планування модульних поїздів, застосування методу еліпсоїдів є неможливим. Тому для оптимізації моделі було розроблено метод, який використовує сучасний математичний апарат ГА [212]. Цей метод передбачає каскадне застосування двох ГА.

Схему алгоритму запропонованого методу показано на рисунку 8.6. Вона передбачає використання двох рівнів ГА. Зовнішній ГА відповідає за пошук оптимальних значень вектора керуючих змінних, які призводять до мінімізації витрат і відповідно зменшення цільової функції, що формується через функцію fitness ГА. Внутрішній ГА у свою чергу спеціалізується на пошуку значень вектора інтервальних змінних, які являють собою тривалості виконання операцій і моделюють найбільш несприятливі сценарії для конкретного набору керуючих змінних. Такий метод, що включає два контури ГА, теоретично потребуватиме достатньо великої кількості обчислень, особливо за великих розмірів задачі. Однак, щоб зменшити обчислювальне навантаження, доцільно максимально спростити процес обчислень у внутрішньому контурі алгоритму.

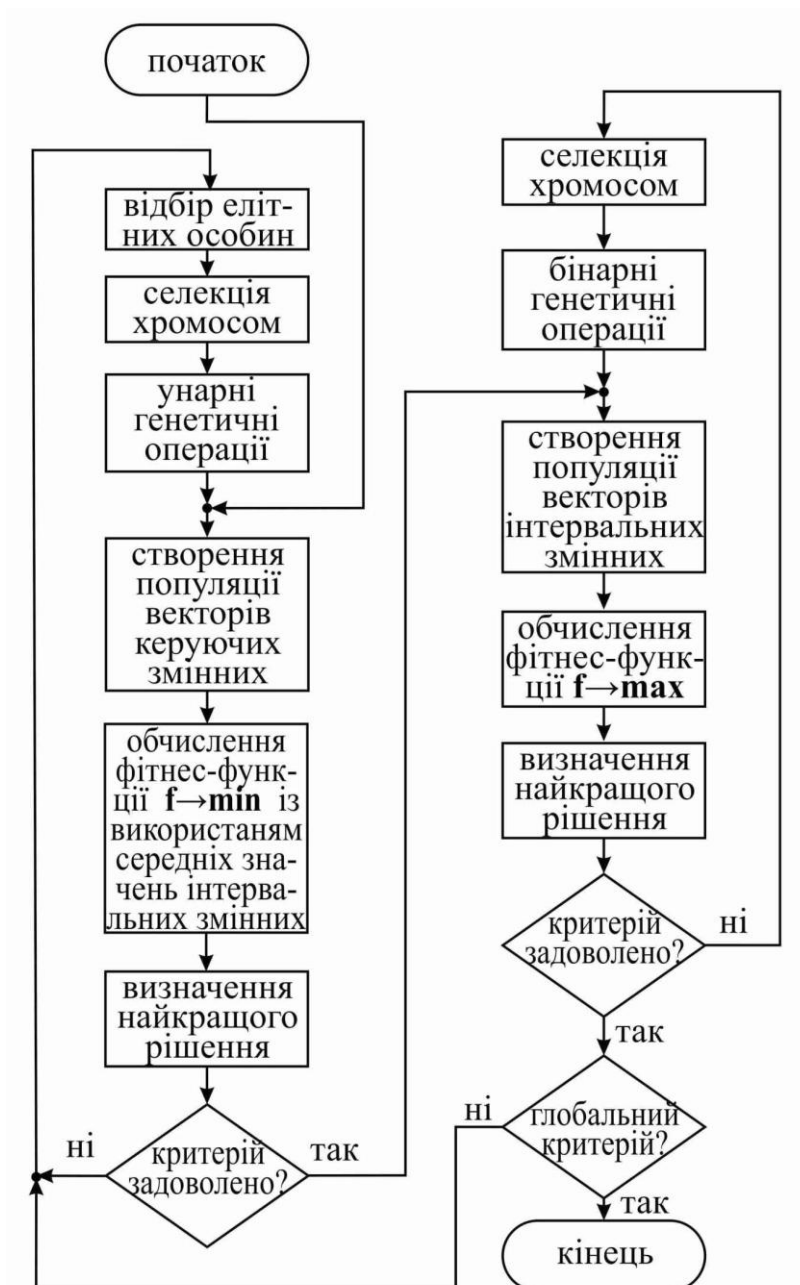


Рисунок 8.6 – Блок-схема двоконтурного ГА для отримання рішення задачі оперативного планування роботи системи швидкого доставлення контейнерів у робастній постановці

Ядро сформованої технології швидкого доставлення контейнерів являє собою інтегрований комплекс, який складається з оптимізаційної робастної математичної моделі та спеціально розробленої процедури її оптимізації, що базований на синергії двох паралельно застосованих ГА, а також модуля інтерпретації отриманих рішень у вигляді побудови графічних моделей (рисунок 8.7).

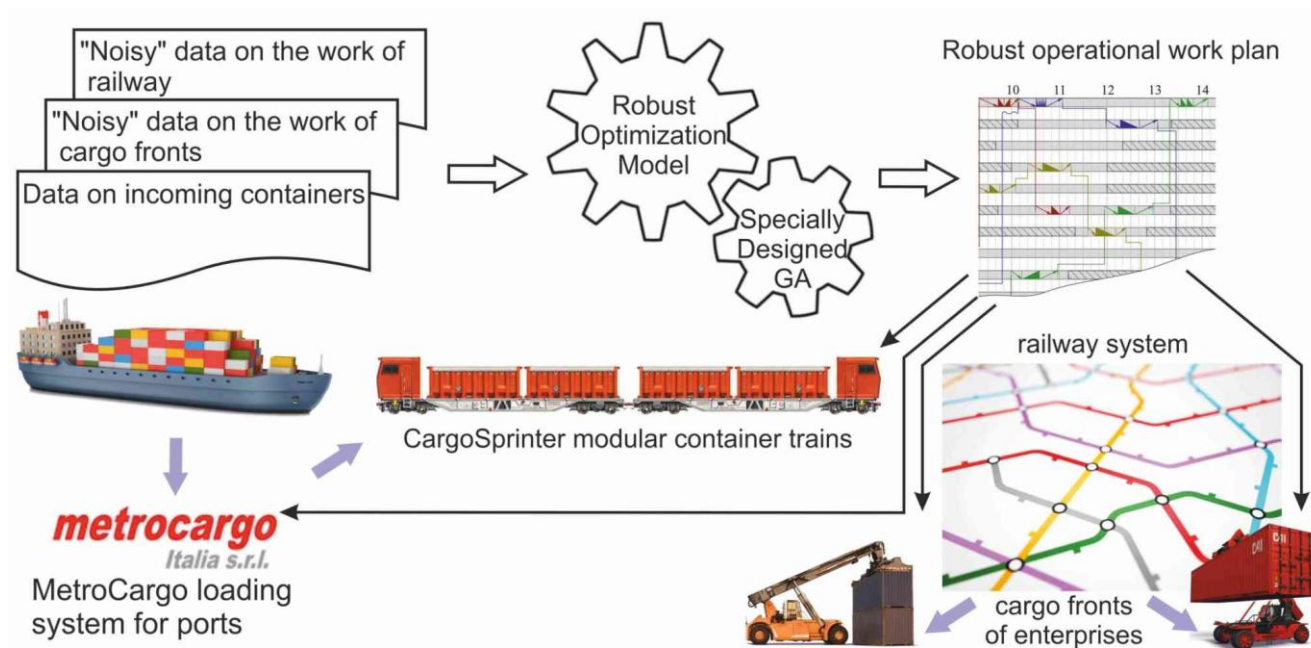


Рисунок 8.7 – Схема розробленої технології оперативного управління системою швидкого залізничного доставлення контейнерів на основі моделі робастної оптимізації

На основі створеної математичної моделі та запропонованого алгоритму з використанням мов програмування Matlab і C# розроблено програмне забезпечення для оптимізації. За допомогою цього програмного забезпечення здійснено моделювання на абстрактному полігоні (рисунок 8.8), який містить кілька десятків залізничних станцій, до яких примикають під'їзні колії підприємств. Одна з цих станцій (станція № 1) безпосередньо пов'язана з портом і оснащена спеціальним вантажним обладнанням MetroCargo для портових терміналів. У таблицях 8.1 і 8.2 наведені вихідні дані для розрахунків, такі як параметри заявок на перевезення та параметри вікон роботи вантажних фронтів, задані за допомогою інтервальних чисел відповідно.

Таблиця 8.1 – Параметри заявок на перевезення

Номер замовлення	Станція навантаження	Станція призначення	Кількість контейнерів
1	1	48	2
2	1	2	2
3	1	42	2
4	1	56	2
5	1	25	2
6	1	24	2
7	1	7	2
8	1	10	2
9	1	11	2
10	27	1	2
11	44	1	2
12	33	1	1
13	31	1	1
14	33	48	1
15	44	24	2

Таблиця 8.2 – Параметри вікон доступності вантажних фронтів

Номер станції	Перше вікно		Друге вікно	
	τ'	τ''	τ'	τ''
2	[9, 10.13]	[13.33, 14]	[15.17, 15.83]	[17, 18.33]
7	[8.5, 9.67]	[12.33, 13.33]	[14.17, 14.83]	[17, 18.33]
10	[8.83, 10]	[12, 14.17]	–	–
11	[7, 8]	[12, 14.17]	–	–
24	[8.75, 9.75]	[13.33, 14.17]	–	–
25	[10.17, 11.33]	[12.83, 14.5]	–	–
27	[7, 8]	[17, 18]	–	–
31	[6.33, 8]	[11.17, 12.33]	[14.17, 15]	[17, 18.5]
33	[7, 8]	[17, 18]	–	–
42	[7, 8]	[10.05, 10.83]	[13.5, 14.77]	[17, 18.33]
44	[7, 8]	[10.25, 11.25]	[13.5, 14.42]	[17, 18.5]
48	[6.33, 8]	[9.33, 10.17]	[11.66, 12.17]	[14.75, 15.75]
56	[10.5, 11.5]	[13.75, 15]	–	–

У результаті оптимізаційного процесу створено схему маршрутів для виконання замовлень на розвезення контейнерів (рисунки 8.8).

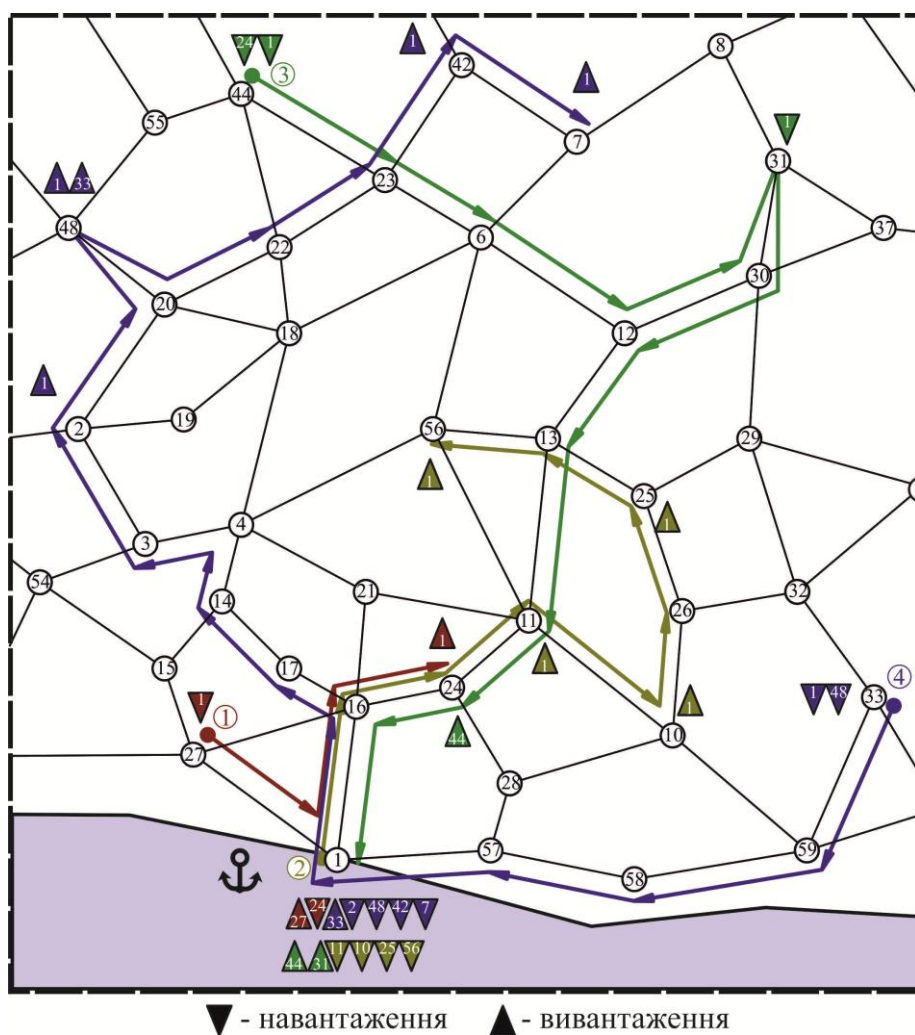


Рисунок 8.8 – Схема абстрактного полігона з наведеними маршрутами руху модульних поїздів згідно з оптимальним планом виконання замовлень, отриманого в результаті оптимізації моделі

У результаті оптимізації також створено оперативний план роботи у вигляді плану-графіка, який для кожного модульного поїзда визначає місце, момент часу тривалість і зміст кодної операції (рисунок 8.9).

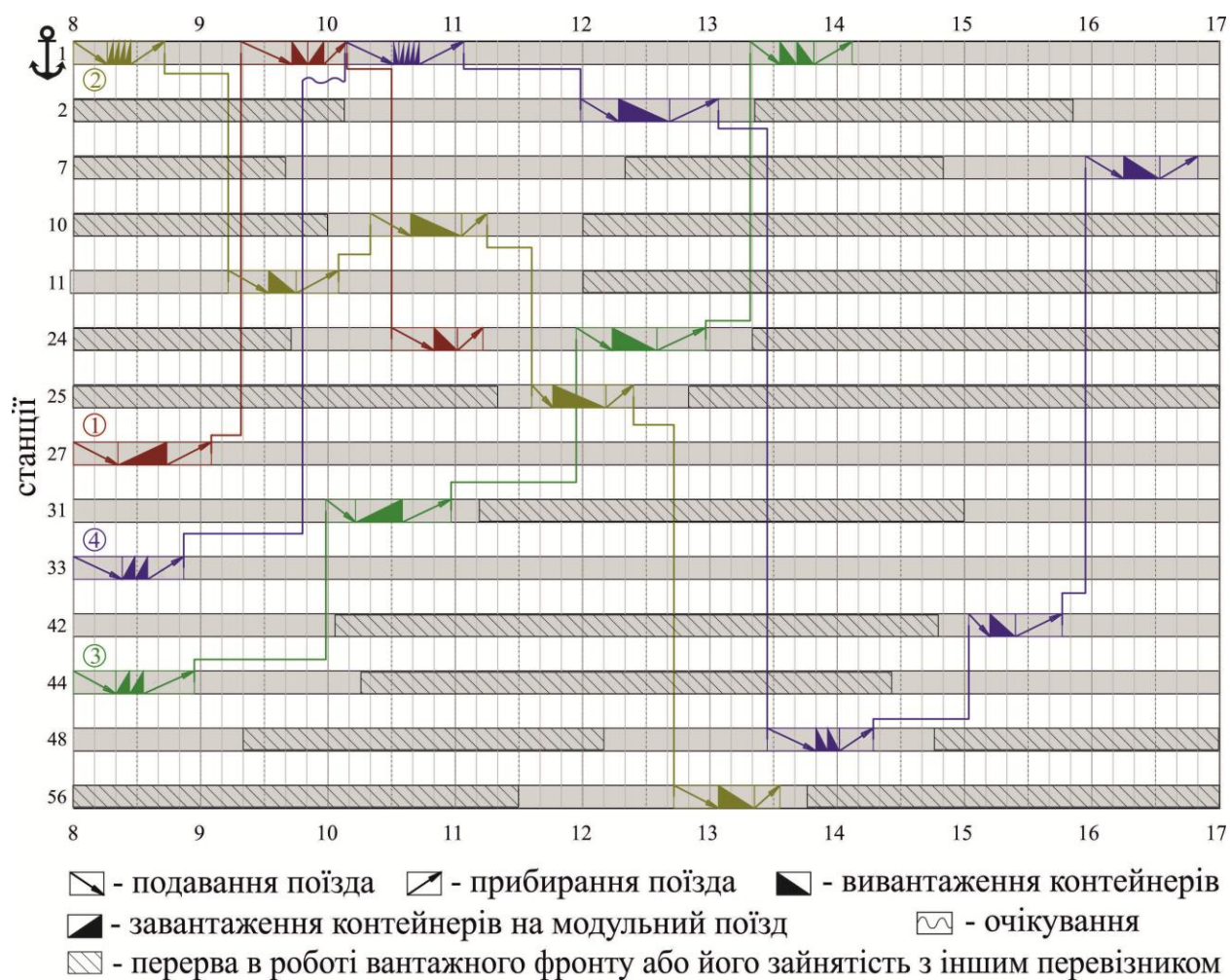


Рисунок 8.9 – Оперативний план роботи системи швидкого доставлення контейнерів у вигляді контактного графіка взаємодії модульних поїздів із вантажними пунктами

Результати, отримані в процесі оптимізації моделі, наведені в таблицях 8.3 і 8.4.

Таблиця 8.3 – Маршрути прямування модульних поїздів

Но мер поїз да	Початков а станція	Маршрут поїзда	Станції вантажних операцій
1	27	27, 1, 16, 24	27, 1, 24
2	1	1, 16, 24, 11, 10, 26, 25, 13, 56	1, 11, 10, 25, 56
3	44	44, 23, 6, 12, 30, 31, 30, 12, 13, 11, 24, 16, 1	44, 31, 24, 1
4	33	33, 59, 58, 57, 1, 16, 17, 14, 3, 2, 20, 48, 20, 22, 23, 42, 7	33, 1, 2, 48, 42, 7

Таблиця 8.4 – Параметри виконання заявок

Номер замов- лення	Станція наванта- ження	Станція призна- чення	Кіль- кість контей- нерів	Поїзд	Час початку операції наванта- ження	Час початку операції виванта- ження
1	1	48	2	4	10:36	13:50
2	1	2	2	4	10:33	12:17
3	1	42	2	4	10:38	15:12
4	1	56	2	2	08:25	13:04
5	1	25	2	2	08:22	11:46
6	1	24	2	1	09:51	10:50
7	1	7	2	4	10:42	16:14
8	1	10	2	2	08:19	10:38
9	1	11	2	2	08:16	9:32
10	27	1	2	1	08:21	09:43
11	44	1	2	3	08:27	13:33
12	33	1	1	4	08:23	10:31
13	31	1	1	3	10:13	13:42
14	33	48	1	4	08:29	13:54
15	44	24	2	3	08:20	12:13

Розрахований план забезпечує виконання 15 заявок на перевезення контейнерів як із порту до вантажних дворів клієнтів, так і у зворотному напрямку. До цього також включені заявки (дві заявки) на перевезення контейнерів (у тому числі порожніх) між підприємствами або між підприємствами та сухопутними контейнерними терміналами, розташованими на полігоні. В оперативному плані задіяно чотири модульні поїзди, оскільки ця кількість визначена моделлю як

мінімально необхідна для виконання всіх заявок. Як видно з плану-графіка (рисунок 8.9), незважаючи на несприятливу конфігурацію вікон роботи вантажних фронтів підприємств і той факт, що на деяких під'їзних коліях тривалість роботи вантажних фронтів була лише 2-3 год, загальні втрати через невиробничий простій рухомого складу склали лише 0,33 поїздо-години (простій поїзда № 4 біля станції № 1).

Також під час моделювання було виявлено, що отриманий оперативний робастний план перевищив за цільовим критерієм моделі (сумарними експлуатаційними витратами) план, розроблений без урахування невизначеності у вигляді «забруднених» вихідних даних, лише на 6,5 % (таблиця 8.5).

Таблиця 8.5 – Розраховані експлуатаційні витрати

Номер	Вид оперативного плану	Експлуатаційні витрати, тис. грн	Частка, %
1	оптимальний робастний	233.5	106.5
2	оптимальний поточний	219.25	100

Однак у разі реалізації найгіршої комбінації значень вихідних даних виконання звичайного плану було б неможливим без оперативного корегування, і навіть із корегуванням витрати виявилися б до 40 % вищими порівняно з робастним планом.

8.7 Економічне обґрунтування впровадження розробленої технології швидких залізничних контейнерних перевезень

Впровадження запропонованої технології швидкого залізничного доставлення контейнерів залізничним транспортом має значний економічний потенціал завдяки зменшенню часу доставлення контейнерів, що сприяє підвищенню товарообігу і відповідно пришвидшенню обігу коштів підприємств, що має для них пряму фінансову вигоду. Для ілюстрації цієї вигоди розглянемо практичний приклад, де

контейнер із вантажем вартістю 1 млн дол. США перевозять морем протягом 14 днів, а по суші – два дні. З застосуванням нової технології час транспортування по суші скорочується до одного дня, що дає змогу зменшити загальний час доставлення з 16 до 15 днів.

Зменшення часу доставлення на один день може призвести до суттєвої економії на фінансуванні, оскільки кожен день затримки вантажу є витратами для компанії. Зокрема, зі ставкою дисконтів 12 % річних економія від прискорення обігу вантажу становить приблизно 329 дол. США, і це лише за один такий контейнер. До речі, вантаж лише одного 20-футового контейнера, що складається, наприклад, із різних сортів африканської або азійської деревини (червоне, чорне, рожеве дерево), може коштувати декілька мільйонів доларів, вміст контейнера, що перевозить радіочипи, може коштувати ще набагато більше.

До того ж доставлення за допомогою прямого перевантаження контейнерів із судна-контейнеровоза на поїзди CargoSprinter, вочевидь, буде більш надійним як завдяки виключенню проміжних видів транспорту, таких як річстакери та інші транспортери, а також виключенню фази перебування контейнерів на причальних майданчиках і портових терміналах, що в свою чергу до того ж поуребувало б суттєвих додаткових витрат. Крім того таке рішення дозволить уникнути додаткової аварійності та залежності від погодних та складних дорожніх умов, притаманних автомобільному транспорту.

Однак вигода від скорочення часу доставлення поширюється не лише на великі компанії. Постійні клієнти, які перевозять дороговартісні вантажі або здійснюють регулярні перевезення і тому за рік мають певні обсяги замовлень, також можуть значно виграти від цієї технології, отримуючи економічні переваги завдяки зниженню витрат на фінансування товарів, а також покращенню рівня обслуговування клієнтів. Завдяки цьому розроблена технологія стає привабливим вибором для всіх учасників ланцюга постачання, які прагнуть підвищення оперативності та ефективності своїх логістичних процесів.

Отже, впровадження цієї технології сприяє не тільки збільшенню швидкості доставлення, але і зниженню фінансових витрат, що є особливо важливим для

великих компаній із великими обсягами перевезень. Усе це лише підкреслює економічну доцільність і вигідність технології, адже вона сприяє відчутному зменшенню витрат і підвищенню ефективності бізнесу, особливо коли вантажі мають високу вартість, і кожен день затримки може, окрім фінансових витрат, також негативно впливати на технологічний процес підприємств.

Успішне впровадження нової технології, безумовно, принесе значні переваги в скороченні часу доставлення і підвищенні ефективності перевезень. Проте, незважаючи на очевидні переваги нових технологій, процес завоювання клієнтів може бути тривалим і складним.

Часто ухвалення нових технологій затримується через людську психологію і поведінкові фактори.

Модель дифузії іновацій Басса [224, 225], застосовувана для прогнозування сприйняття нових технологій, є ефективним інструментом для оцінювання потенційних темпів впровадження інновацій у транспортній галузі. Ця модель описує процес дифузії інновацій у суспільстві і оцінює, як швидко нові технології будуть сприйняті ринком. Вона базована на двох основних параметрах: коефіцієнті іновації (p) і коефіцієнті імітації (q), які визначають швидкість поширення нововведень серед потенційних користувачів.

Модель Басса в застосуванні до впровадження розробленої транспортної технології можна записати таким диференціальним рівнянням:

$$\frac{dF(t)}{dt} = (p + q \cdot F(t)) \cdot (1 - F(t)), \quad (8.6)$$

де $F(t)$ – частка транспортного ринку, яку захопила нова технологія завдяки клієнтам, що перейшли на неї на момент часу t ;

p – коефіцієнт іновації, визначає базовий рівень сприйняття іновації, незалежно від соціального впливу. Це безпосередня «технічна» частка сприйняття нововведення;

q – коефіцієнт імітації, визначає, наскільки швидко інновація буде набирати популярність завдяки соціальному впливу та рекомендаціям. Це частка, яка моделює ефект наслідування і популяризації через соціальні мережі або приклади інших.

Це дифенціальне рівняння є рівнянням зі змінними, які можна поділити:

$$\frac{dF(t)}{(p + q \cdot F(t)) \cdot (1 - F(t))} = dt. \quad (8.7)$$

Далі проінтегруємо обидві частини:

$$\int \frac{dF(t)}{(p + q \cdot F(t)) \cdot (1 - F(t))} = \int dt. \quad (8.8)$$

Підставивши $u = 1 - F(t)$ і $du = -dF(t)$ і вирішивши інтеграл, отримаємо рішення у вигляді аналітичної залежності

$$F(t) = \frac{1 - e^{-(p+q)t}}{1 + \frac{q}{p} e^{-(p+q)t}}. \quad (8.9)$$

Модель Басса доцільно застосувати для моделювання захоплення ринку запропонованою інноваційною технологією сухопутних контейнерних перевезень переважно на короткі та середні відстані в контексті інтермодальних систем. За допомогою неї можна розрахувати динаміку частки захоплення ринку новою транспортною технологією і відповідно до цього отримати реалістичних прогноз грошових потоків. Слід зазначити, що з різних причин не всі клієнти навіть через тривалий проміжок часи сприймуть цю технологію і перейдуть на неї. Тому під ринком будемо розуміти лише ту частку загального ринку, здатну раніше чи пізніше сприйняти іноваційну технологію.

Для оцінювання економічної ефективності впровадження розробленої технології використовують кілька основних параметрів і розрахунків. Розглянемо це на прикладі. Прийmemo, що капітальні витрати, необхідні для реалізації проєкту, складають 30 млн дол. США. Ці витрати включають усі початкові інвестиції, такі як придбання та установлення обладнання, а саме термінального обладнання MetroCargo, а також поїздів CargoSprinter. Для розрахунку фінансової привабливості застосовано ставку дисконтування [226], визначувану як суму процентної ставки комерційних банків (8 %) і рівня інфляції (4 %), - 12 %. Ця ставка дає змогу привести майбутні грошові потоки до їхньої поточної вартості, ураховуючи вартість грошей у часі та очікуване зростання цін.

Проєкт має прогнозований життєвий цикл 20 років, за який можливий всебічний аналіз його ефективності протягом тривалого періоду. Модель Басса використовують для прогнозування темпів сприйняття нової технології. Основні параметри моделі Басса включають коефіцієнт інновації (p), який відображує ймовірність самостійного сприйняття нової технології, зазвичай ця ймовірність є вкрай низькою, тому приймаємо її на рівні 0.03, і коефіцієнт імітації (q), що показує вплив соціальних факторів і поведінки інших користувачів на сприйняття технології, він має бути значно вищим за (p), але все одно в бізнес-середовищі він навряд чи реально може перевищувати 0.5, тому приймаємо його на рівні 0.38.

Щорічні витрати, включаючи амортизацію та поточні витрати, складатимуть 5 і 3 % капітальних витрат відповідно. Ці витрати також кореговані на інфляцію, що дає змогу врахувати реальні зміни у витратах із часом.

Розрахунок грошових потоків здійснюється на основі прогнозованого обороту ринку, корегований на інфляцію. Модель оцінює, як збільшення обороту ринку і сприйняття нової технології впливають на грошові потоки, а також ураховує амортизацію і поточні витрати. Дисконтовані грошові потоки розраховують із використанням ставки дисконтування, щоб визначити чисту приведену вартість (NPV) [227], яка в нашому випадку фактично дорівнює економічному ефекту (адже ми не розглядаємо екологічний та інші аспекти цього проєкту), і внутрішню норму

дохідності (IRR) проєкту, а також рівень окупності інвестицій (ROI) і строк окупності (PP) [228].

На основі цієї моделі проведено розрахунки, результати яких наведені в таблиці 8.6 і на рисунку 8.10.

Таблиця 8.6 – Розрахунки динаміки економічних показників

роки	дисконтований обіг охопленої частки ринку, млн дол.	дисконтовані амортизаційні витрати, млн дол.	дисконтовані поточні витрати, млн дол.	дисконтовані сумарні витрати, млн дол.	чистий грошовий потік, млн дол.	дисконтований чистий грошовий потік, млн дол.	дисконтований валовий дохід нарастаючим підсумком, млн дол.	дисконтовані сумарні витрати нарастаючим підсумком, млн дол.	дисконтований економічний ефект нарастаючим підсумком, млн дол.
1	2.56	1.34	0.80	2.14	0.46	0.41	2.56	32.14	-29.59
2	5.65	1.24	0.75	1.99	4.59	3.66	8.21	34.13	-25.92
3	9.28	1.15	0.69	1.84	10.44	7.43	17.49	35.98	-18.49
4	13.34	1.07	0.64	1.71	18.3	11.63	30.83	37.70	-6.86
5	17.60	1.00	0.60	1.60	28.2	16.00	48.43	39.29	9.14
6	21.66	0.92	0.55	1.47	39.84	20.18	70.09	40.77	29.32
7	25.14	0.86	0.52	1.38	52.53	23.76	95.23	42.14	53.09
8	27.71	0.80	0.48	1.28	65.44	26.43	122.93	43.42	79.52
9	29.24	0.74	0.44	1.18	77.8	28.05	152.17	44.60	107.57
10	29.79	0.69	0.41	1.10	89.12	28.69	181.97	45.70	136.26
11	29.55	0.64	0.38	1.02	99.23	28.53	211.51	46.72	164.79
12	28.72	0.59	0.36	0.95	108.2	27.77	240.23	47.67	192.56
13	27.52	0.55	0.33	0.88	116.24	26.64	267.75	48.55	219.20
14	26.10	0.51	0.31	0.82	123.58	25.29	293.86	49.37	244.49
15	24.59	0.47	0.28	0.75	130.44	23.83	318.45	50.13	268.32
16	23.05	0.44	0.26	0.70	137.01	22.35	341.50	50.83	290.67
17	21.55	0.41	0.25	0.66	143.44	20.89	363.05	51.49	311.56
18	20.09	0.38	0.23	0.61	149.84	19.48	383.14	52.10	331.04
19	18.71	0.35	0.21	0.56	156.29	18.15	401.85	52.66	349.19
20	17.41	0.33	0.20	0.53	162.86	16.88	419.26	53.19	366.07

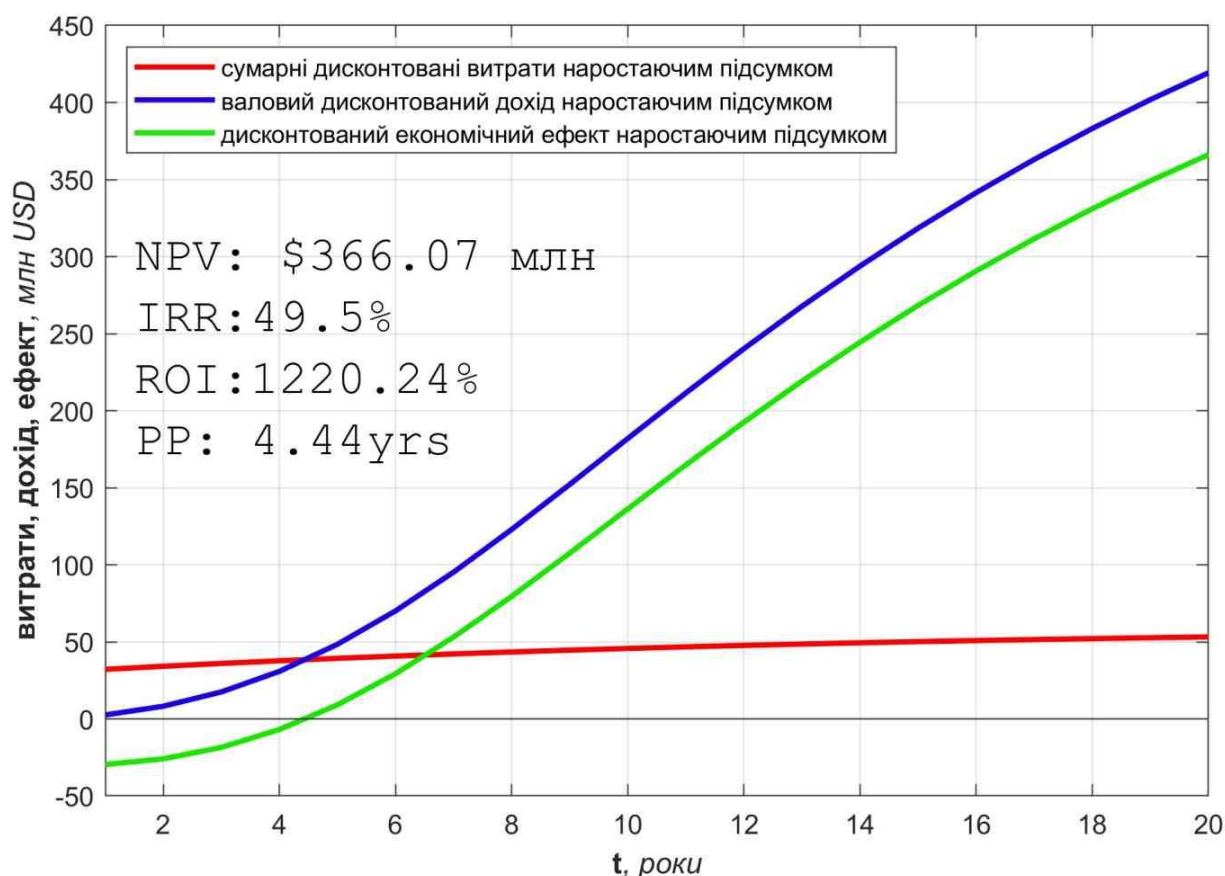


Рисунок 8.10 – Динаміка сумарних витрат, валового доходу та економічного ефекту наростаючим підсумком

Отримані результати розрахунків для проєкту впровадження інноваційної транспортної технології контейнерних перевезень демонструють вражаючу економічну ефективність. Чиста приведена вартість (NPV) становить 366.07 млн дол. США. Це означає, що після врахування всіх витрат і дисконтованих грошових потоків проєкт приносить значний чистий прибуток, що значно перевищує початкові капітальні інвестиції в розмірі 30 млн дол. Висока внутрішня норма дохідності (IRR) на рівні 49.5 % свідчить про те, що проєкт має надзвичайно привабливу рентабельність, значно перевищуючи вартість капіталу та альтернативні інвестиційні можливості. Показник рентабельності інвестицій (ROI) 1220.24 % підтверджує, що кожен вкладений долар приносить понад десятикратний дохід. Крім того, важливим показником є строк окупності інвестицій (PP), який складає 4.44 року. Це означає, що початкові інвестиції будуть повністю повернуті менш ніж

за п'ять років, що є досить коротким строком для таких масштабних інфраструктурних проєктів.

Аналіз цих фінансових показників дає змогу зробити висновок, що проєкт впровадження запропонованої іноваційної транспортної технології не лише виправдовує початкові інвестиції, але й забезпечує значний економічний ефект для інвесторів і користувачів. Висока швидкість доставлення контейнерів порівняно з традиційними методами транспортування підвищує привабливість такої технології для клієнтів, особливо тих компаній, які мають потребу в прискореному обороті коштів. Це може призвести до зростання ринкової частки залізничного транспорту в секторі контейнерних перевезень і збільшення доходів залізничних операторів.

Загалом результати дослідження свідчать про те, що інвестування в цей проєкт є економічно обґрунтованим і перспективним рішенням. Впровадження інноваційних технологій на основі таких технічних рішень, як висококомобільні поїзди типу CargoSprinter та автоматичні системи MetroCargo, що здійснюють прямі вантажні операції з контейнерами, сприятиме підвищенню ефективності транспортних послуг, збереженню екології довкілля, зменшенню часу доставлення вантажів і, як наслідок, збільшенню фінансових вигод для операторів і клієнтів. Цей проєкт має всі шанси стати новим стандартом у галузі контейнерних перевезень, сприяючи розвитку інфраструктури і зміцненню позицій залізничного транспорту на ринку.

8.8 Висновки до восьмого розділу

Розвиток залізничного транспорту як у Європі, так і в Україні демонструє суттєве зростання частки на ринку контейнерних перевезень. Це підтверджено значними інвестиціями в інфраструктуру та відкриттям доступу до залізничних мереж приватним операторам. В Україні вже розроблено відповідний законопроєкт, який, усе ще не ухвалений, уже зараз передбачає підвищення привабливості

залізничних перевезень для вантажовідправників і збільшення обсягів контейнерних перевезень через великі порти, такі як Роттердам і Гамбург. На коротких і середніх дистанціях автомобільний транспорт продовжує домінувати завдяки своїй гнучкості та швидкості доставлення.

Аналіз проблем, пов'язаних із трансфером контейнеропотоків між морським і сухопутними видами транспорту, показав, що основними викликами інтермодальних перевезень є перевантаження контейнерних терміналів і недостатня пропускна спроможність автодоріг, особливо в міських припортових зонах. В Україні стан багатьох магістральних автодоріг є незадовільним, що частково зумовлено активними бойовими діями. Пандемія COVID-19 виявила вразливість транспортних систем до перевантажень, що спричинило збої в роботі контейнерних терміналів. Незважаючи на удосконалення технологій, перевезення від порту до кінцевого отримувача залишається складним етапом маршруту.

У результаті аналізу розроблено нову технологію інтеграції залізничної і портової інфраструктури для уникнення додаткових операцій з перевантаженням контейнерів із суден на поїзди. Основними матеріальними компонентами цієї нової технології є модульні поїзди CargoSprinter та автоматичні вантажні системи MetroCargo™. Поїзди CargoSprinter забезпечують високу швидкість і гнучкість завдяки відсутності окремих локомотивів, можуть швидко реагувати на потреби клієнтів і зменшують залежність від автомобільного транспорту. Інтеграція з системами MetroCargo™ дає змогу автоматизувати процеси завантаження та розвантаження контейнерів, знижуючи витрати та підвищуючи безпеку.

Розроблена технологія підвищує ефективність контейнерних перевезень, скорочуючи строк доставлення контейнерів сухопутною частиною шляху. Створено модель управління для ефективної координації роботи всіх учасників процесу. Ураховуючи високий рівень невизначеності, модель подана у робастній формі з використанням інтервальних чисел, щоб ефективно протидіяти факторам невизначеності.

У результаті проведеного дослідження розроблено спеціальну процедуру оптимізації на основі каскадного ГА з двома рівнями: зовнішнім для оптимізації

керуючих змінних і внутрішнім для визначення несприятливих сценаріїв виконання операцій. Використання робастної оптимізації для вирішення завдання планування контейнерних перевезень в умовах невизначеності дає змогу значно підвищити ефективність роботи транспортної системи.

Проведений аналіз демонструє, що з використанням робастної оптимізації можна знизити ризики, пов'язані з невизначеністю в контейнерних перевезеннях. Це особливо актуально в умовах сучасного ринку, де зміни можуть відбуватися дуже швидко, а адаптація до нових умов потребує швидких і точних рішень. Розроблене програмне забезпечення в середовищі Matlab успішно оптимізувало схему маршрутів і план-графік доставлення контейнерів. Отриманий робастний план забезпечив виконання 15 заявок із мінімальними витратами часу та ресурсів, перевищивши оптимальний ситуативний план лише на 6,5 % за витратами в умовах невизначеності.

Для подальшого розвитку технології швидких залізничних контейнерних перевезень необхідно враховувати економічні аспекти. На основі проведених економічних розрахунків щодо впровадження нової технології встановлено, що проєкт має високу внутрішню норму дохідності (49.5 %) і показник рентабельності інвестицій (1220.24 %), а строк окупності інвестицій складає 4.44 року. Це свідчить про високу економічну ефективність впровадження технології.

Висока швидкість доставлення, надійність і зниження витрат роблять нову технологію привабливою для вантажовідправників і можуть призвести до зростання ринкової частки залізничного транспорту в секторі інтермодальних контейнерних перевезень. Крім того, використання сучасних технологій і робастних методів оптимізації підвищує конкурентоспроможність залізничного транспорту, зменшуючи залежність від автомобільних перевезень і покращуючи загальну ефективність логістичних систем.

Отже, проведений аналіз і розроблені рішення підтверджують доцільність впровадження нових технологій і методів управління у сферу контейнерних перевезень. Вони сприяють зниженню рівня невизначеності та ризиків, підвищуючи ефективність і надійність транспортних систем, що є критично важливим для

забезпечення стійкого розвитку економіки в сучасних умовах. Застосування робастної оптимізації дає змогу значно знизити ризики, пов'язані з невизначеністю в контейнерних перевезеннях. Це особливо актуально в умовах сучасного ринку, де зміни можуть відбуватися дуже швидко, а адаптація до нових умов потребує швидких і точних рішень. Розроблене програмне забезпечення мовами Matlab та C# успішно оптимізувало схему маршрутів і план-графік доставлення контейнерів.

Отримані результати демонструють, що нова технологія може бути ефективно впроваджена в контейнерні перевезення, забезпечуючи надійність і ефективність у контексті невизначеності. Запропоновані підходи для управління та оптимізації є вагомим внеском у розвиток теорії та практики управління операційною діяльністю залізничної системи в умовах невизначеності та ризиків.

ВИСНОВКИ

Проведено детальний аналіз основних аспектів управління ризиками та невизначеністю в контексті експлуатаційної діяльності залізничного транспорту. Цей аналіз включав онтологічне дослідження понять невизначеності та ризику.

Проведено ідентифікацію факторів невизначеності в контексті управління експлуатаційною роботою, що дало змогу виділити два основні класи цих факторів: алеаторні та епістемічні, і виявити основні джерела невизначеності: непередбачуваність транспортних потоків, недостатність даних, спотворення інформації, випадкові відмови, людський фактор, похибки моделей, важко передбачувані зміни ринкової кон'юнктури, правових та економічних відносин тощо.

Аналіз наукових статей, присвячених управлінню експлуатаційною роботою залізничних систем, підтверджує важливість і актуальність досліджень у сфері управління в умовах невизначеностей і ризиків. Проблема невизначеності та ризиків є критичною, оскільки безпосередньо впливає на ефективність, безпеку та надійність транспортних операцій. За результатами аналізу вітчизняних і закордонних досліджень виокремлено кілька загальних недоліків, які потребують подальшого опрацювання. По-перше, більшість досліджень не забезпечує єдиного підходу для управління ризиками та невизначеністю, що ускладнює порівняння та адаптацію результатів до конкретних умов. По-друге, деякі роботи недостатньо враховують широкий спектр випадкових факторів, таких як сезонність і зміни в пасажирському попиті.

Окрім того, встановлено, що сучасні математичні моделі часто мають обмеження у прогнозуванні та адаптації до швидко змінюваних умов протікання технологічних процесів та оперативної обстановки, що у свою чергу підтверджує необхідність розроблення більш комплексних і універсальних підходів для управління невизначеністю і ризиками.

Аналіз експлуатаційної діяльності залізничної системи України показав, що її сучасний стан відзначається негативними тенденціями у зменшенні обсягів перевезень, що посилюється через воєнні конфлікти і інші зовнішні фактори.

Крім того, під час дослідження виявлено негативні тенденції до погіршення багатьох кількісних і якісних показників експлуатаційної роботи, зокрема збільшення середньої тривалості обігу вантажного вагона, зменшення кількості маневрових локомотивів, зростання штрафів за несвоєчасне доставлення вантажів тощо.

Однак такі тенденції відбуваються попри те, що останніми роками формально значно покращилось інформаційне забезпечення управлінського процесу, що свідчить про те, що підходи і технології управління експлуатаційною роботою, розроблені ще за часів планової економіки, є певною мірою застарілими і не можуть забезпечити перехід на адаптивні логістичні моделі управління, особливо в умовах ринкового середовища, якому притаманні високі рівні невизначеності та ризиків на фоні постійного підвищення вимог до якості транспортної продукції.

Для оцінювання якості інформаційного забезпечення управлінського процесу проаналізовано зразки даних, збережені в системі АСК УЗ Є та використовувані для вироблення рішень у сфері управління експлуатаційною роботою залізничного транспорту України. Використано новітні методи аналізу, такі як вейвлет-спектрограма та R/S-аналіз, метод крос-вейвлет аналізу, регресійно-кореляційні методи та методи аналізу чутливості тощо. Встановлено, що істотні невизначеності даних пов'язані переважно не з похибками механізмів збору та зберігання інформації, а насамперед із природною волатильністю і стохастичністю транспортних процесів.

Загалом результати дослідження підтвердили необхідність системних змін в управлінських підходах і технологіях для підвищення ефективності експлуатаційної роботи залізничного транспорту в умовах високоволатильного середовища.

На прикладі класичних задач управління експлуатаційною роботою продемонстровано підходи для зниження рівня невизначеностей як епістемічного, так і алеаторного типу, рівень яких стає дедалі вищим у сучасних умовах. Зокрема,

на прикладі задачі розрахунку ПФП доведено ефективність такого підходу, як уточнення управлінських моделей. Задачу розрахунку ПФП формалізовано у вигляді оптимізаційної моделі, яка реалізує уточнення цільового критерію, за рахунок урахування залежності витрат вагоно-годин на переробку вагонопотоків від рівня завантаженості СС. Уточнення моделі дало змогу знизити реальні технологічні витрати на 405,71 ваг. год, що відповідає 3,5 % загальних витрат на накопичення та переформування поїздів.

Вирішено задачу планування місцевої роботи на залізничній дільниці в умовах невизначеності, обумовленої коливаннями обсягів місцевої роботи по станціях дільниці. З цією метою вирішення задачі реалізовано за допомогою розробленої математичної моделі стохастичної робастної оптимізації. Обсяги місцевої роботи в рамках цієї моделі запропоновано подавати за допомогою стохастичних інтервальних чисел, які використовують статистичні дискретні розподіли імовірності. За відсутності статистичних даних для подання стохастичних змінних запропоновано використання біноміального розподілу. Під час моделювання доведено ефективність використання запропонованої моделі в умовах невизначеності.

Також, виходячи з вищезазначеної необхідності системних змін в управлінських підходах і технологіях, розроблено нейромережеву модель визначення пріоритетності обробки вагонів, що несуть потенційний ризик затримок, яка враховує параметри вагона, такі як поточні затримка, залишковий час прямування, провізна плата. Незважаючи на компактність, модель виявилася недостатньо гнучкою для сучасних умов і вимог до СППР.

Тому розроблено новий підхід на основі ТДШ, щоб ураховувати нечітку і навіть суперечливу інформацію, поєднуючи дані з різних джерел. Це дає змогу максимально врахувати всю наявну інформацію і зменшити невизначеність, оцінюючи ризики і підвищуючи точність прогнозів. У контексті моделювання ризиків запропоновано функцію щільності ризику, яку визначають як добуток мас-функції впевненості в затримці і штрафної функції, яка може залежати від тривалості затримки, у тому числі і нелінійно.

Реалізація цього підходу втілена в математичній моделі векторної оптимізації. Модель призначена для оперативного планування роботи ТС і включає дві цільові функції: сумарні експлуатаційні витрати і ризик затримки доставлення вантажів. Результати моделювання показали значне зниження рівня ризику на 62,4 % і одночасно зменшення експлуатаційних витрат на 7,99 %.

Вирішена задача оптимізації перевезень на напрямку, на якому швидкісні поїзди використано як проміжний інтермодальний транспорт у системі туристичних перевезень. Створено модель нечіткого логічного виведення (FIS), що моделює функцію корисності, яка формалізує ухвалення рішення про здійснення подорожі, частково нівелюючи невизначеність, що пов'язано з суб'єктивним сприйняттям факторів вибору, таких як час подорожі, доступність станції, вартість квитка тощо.

Розроблено оптимізаційну модель цілочисельного програмування, яка реалізує технологію пропускання зупинок з плануванням маршрутів швидкісних поїздів на напрямку. Цільовим критерієм моделі є загальний прибуток компанії-оператора. За результатами моделювання доведено, що такий підхід дає змогу зберегти значну частину потенційного туристичного пасажирського потоку і забезпечити ефективне охоплення пасажирського трафіка між проміжними станціями.

Крім того, з метою отримання якісних вихідних даних розроблено модель прогнозування, яка використовує нейромережеву архітектуру GAN (генеративно-змагальна мережа) і дає змогу зберегти інформацію про зв'язки кореспонденції пасажиропотоків між станціями напрямку, подавши історичні дані у вигляді багатовимірних часових рядів. Похибка прогнозу в середньому не перевищувала 6 %.

Під час аналізу доведено, що контейнерні перевезення є критично важливими для сучасних глобальних логістичних ланцюгів, і залізничний транспорт забезпечує їхню ефективність, надійність і екологічність. У результаті аналізу з використанням статистичних методів, зокрема тестів статистичного аналізу, таких як розширений Дікі-Фуллера і Квятковського-Філліпса-Шмідта-Шина, встановлено стохастичний і нестационарний характер контейнеро-потоків, що надходять до термінальних залізничних станцій. Це ускладнює планування технологічних операцій і підвищує

ризика зриву графіків доставлення контейнерів до порту і відповідно застосування різних штрафних санкцій.

Проблема раціоналізації процесу одночасного формування контейнерних поїздів на термінальних залізничних станціях і просування їх до порту вирішена за рахунок формування математичної моделі стохастичної оптимізації, що враховує не лише різні технологічні витрати, але й ризики, пов'язані із запізненням прибуття контейнерів і заповненням зафрахтованих контейнеро-місць. Модель враховує імовірнісні складові, пов'язані не лише з параметрами контейнеро-потоків, але й тривалістю просування поїздів залізничною мережею в бік порту, ураховуючи проходження обробки на технічних станціях. Модель також враховує можливість формування як неповноскладових поїздів, так і поїздів із понаднормовою кількістю вагонів, що є важливим для ефективної роботи термінальних станцій і зменшення експлуатаційних витрат.

Запропонована модель завдяки застосуванню підходів теорій випадкових потоків і часових точкових процесів дає змогу мінімізувати негативний вплив факторів невизначеності і ризику в процесі формування і просування контейнерних поїздів у складі функціонування інтермодальних систем. У результаті моделювання доведено, що модель забезпечує зниження експлуатаційних витрат і підвищення ефективності контейнерних перевезень, що є важливим для успішної інтеграції залізничного транспорту в глобальні логістичні системи.

З метою набуття залізничним транспортом критичної переваги в конкурентній боротьбі в сегменті ринку перевезень контейнерних перевезень на середні і короткі відстані в рамках систем інтермодальних перевезень розроблена технологія швидкого доставлення контейнерів із застосуванням залізничного транспорту. Така технологія, зокрема, передбачає щільну інтеграцію залізниці і портової інфраструктури завдяки застосуванню автоматичних вантажних систем MetroCargo™, а також підвищення швидкості і мобільності залізничного транспорту завдяки застосуванню модульних контейнерних поїздів типу CargoSprinter. Основним моментом технології є розроблена модель управління, що являє собою математичну модель змішаної комбінаторної робастної оптимізації, цільова функція

якої подана як критерій експлуатаційних витрат. Модель планує роботу модульних поїздів, які фактично курсують у кур'єрському режимі. Реалізуючи принцип мінімаксу, модель забезпечує робастність отриманого рішення, зменшуючи негативний вплив факторів невизначеності, пов'язаний із недостатністю інформації та мінливістю границь «вікон» доступності вантажних фронтів підприємств-вантажоотримувачів і вантажовідправників.

Для уникнення непомірних обсягів обчислень, пов'язаних із робастною постановкою задачі, розроблено спеціальну процедуру на основі запропонованого двоконтурного генетичного алгоритму, внутрішній і зовнішній контури якого забезпечують відповідно максимізацію і мінімізацію цільової функції.

За результатами моделювання встановлено, що витрати робастного плану перевищують витрати оптимального плану зі сталими вихідними даними лише на 6,5 %, що є прийнятною платою за робастність, яка у той же час компенсується можливістю оперативно реагувати на непередбачувані зміни, уникаючи значних затримок і збитків.

Економічний ефект від впровадження такої технології виникає завдяки перерозподілу транспортного ринку і відповідного збільшення прибутку залізничного оператора контейнерної доставки. Для полігона з початковим обігом відповідного ринку контейнерних перевезень у 100 млн дол. величина очікуваної чистої приведеної вартості від експлуатації такої технології за 20 років становила 366 млн дол., очікувана величина внутрішньої норми дохідності - на рівні 49,5 %, строк окупності – 4,4 року.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Dimitrov P. & Azadfar S. (2015). Uncertain Models on Railway Transportation Planning Problem. *International Journal of Transportation Engineering*. 3(2), 125–136.
2. Barber T. D. (2018). Reduction of railway system failures through technical uncertainty analysis (Doctoral dissertation). The George Washington University, Washington, DC.
3. Cacciabue P. C. & Montecchi C. (2016). Human factor analysis of accidents in railway systems: Application of the CREAM methodology. *Applied Mathematical Modelling*. 40(5-6), 3512-3522.
4. Chen Chunyang, Yu Deming. Risk Management and Controlling Measures Utilized During Implementation of China Railway's «Go Global» Strategy. *Strategic Study of Chinese Academy of Engineering*. 2017, 19(5): 62–67. <https://doi.org/10.15302/J-SSCAE-2017.05.011>.
5. Khalil A., Laaouad O., Djebabra M. & Fawzi B. (2022). A framework for improving the resilience of railway systems using an integrated approach. *Information Sciences*. 598, 85-102.
6. Ren J., Yao Y., Gao R. & Wang Z. (2021). A holistic approach to risk assessment and management for high-speed railway operations. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*. 149, 188-207.
7. Huang Y., Zhu D., Wang Y., Li S. & Xu Y. (2018). A multistage collaborative optimization model for high-speed railway line planning and timetabling. *European Journal of Operational Research*. 267(3), 931-945.
8. Shuib A., Alwadood Z. A Railway Rescheduling Model with Priority Setting. *Pertanika Journal of Science & Technology*. 2017. 25(2). P. 649–660.
9. Zhang Q., Lusby R., Shang P., Zhu X. Simultaneously re-optimizing timetables and platform schedules under planned track maintenance for a high-speed railway network. *Transportation Research Part C : Emerging Technologies*. 2020. Vol. 121. P. 102823. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.trc.2020.102823>.

10. Yin M., Qiu F. & Zheng Z. (2021). Resilient train timetabling under station capacity uncertainty. *European Journal of Operational Research*. 290(1), 118-133.
11. LI Bing, CHEN Xiaoyue, XUAN Hua. Integrated Optimization for Train and Wagons in Railway Terminal with Multiple Marshalling Yards. *Operations Research and Management Science*. 2024, 33(1): 29-35. <https://doi.org/10.12005/orms.2024.0005>.
12. Chang T. S., Nozick L. K. & Turnquist M. A. (2014). Multi-zone service network design for scheduled transportation services. *European Journal of Operational Research*. 235(1), 215-230.
13. Bešinović N., Goverde R. M., Quaglietta E. & Roberti R. (2016). An integrated micro-macro approach to robust railway timetabling. *Transportation Research Part B: Methodological*. 87, 258-278.
14. Guo C., Li S. Optimizing operation of delivering and fetching wagons at a railway station with mixed-shaped goods operation sites. *PLoS ONE*. 2022. 17(1): e0263029. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0263029>.
15. Guo CJ. Multi-objective optimization model and algorithm for scheme of placing-in and taking-out of wagons in branch-shaped freight operation sites. *China Railway Science*. 2017. 38(1). P. 138–143.
16. Guo C. J. Research on optimization of formulation for shunting operation plan of placing-in and taking out wagons based on phase plan. *Journal of the China Railway Society*. 2019. 41(10). P. 10–16.
17. Zhan S., Xie J., Wong S. C., Zhu Y. & Corman F. (2024). Handling uncertainty in train timetable rescheduling: A review of the literature and future research directions. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*. 183, 103429. <https://doi.org/10.1016/j.tre.2024.103429>.
18. Altazin E., Dauzère-Pérès S., Ramond F., Tréfond S. Rescheduling through stop-skipping in dense railway systems. *Transportation Research Part C : Emerging Technologies*. 2017. Vol. 79. P. 73–84. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.trc.2017.03.012>.
19. Abdelhafiez E. A., Salama M. R., Shalaby M. A. Minimizing passenger travel time in URT system adopting skip-stop strategy. *Journal of Rail Transport Planning &*

- Management*. 2017. Vol. 7. Iss. 4. P. 277–290. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jrtpm.2017.11.001>.
20. Dong X., Li D., Yin Y., Ding S., Cao Z. Integrated optimization of train stop planning and timetabling for commuter railways with an extended adaptive large neighborhood search metaheuristic approach. *Transportation Research Part C : Emerging Technologies*. 2020. Vol. 117. P. 102681. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.trc.2020.102681>.
 21. Hassannayebi E., Boroun M., Alaei Jordehi S., Kor H. Train schedule optimization in a high-speed railway system using a hybrid simulation and meta-model approach. *Computers & Industrial Engineering*. 2019. Vol. 138. P. 106110. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cie.2019.106110>.
 22. Yang L., Qi J., Li S., Gao Y. Collaborative optimization for train scheduling and train stop planning on highspeed railways. *Omega*. 2016. Vol. 64. P. 57–76. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.omega.2015.11.003>.
 23. Zhang C., Gao Y., Yang L., Kumar U., Gao Z. Integrated optimization of train scheduling and maintenance planning on high-speed railway corridors. *Omega*. 2019. Vol. 87. P. 86–104. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.omega.2018.08.005>.
 24. Zhong Q., Lusby, R. M., Larsen J., Zhang Y., Peng Q. Rolling stock scheduling with maintenance requirements at the Chinese High-Speed Railway. *Transportation Research Part B : Methodological*. 2019. Vol. 126. P. 24–44. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.trb.2019.05.013>.
 25. Jie Huang, Meicheng Xiong, Jiaoe Wang, Yang Gao, Yongling Li. Temporal efficiency of cross-border railways with multiple simulation scenarios: A case study of the China-Laos Railway *Scientia Geographica Sinica*. 2024, 44(1): 91-98. <https://doi.org/10.13249/j.cnki.sgs.20220571>.
 26. Caprara A., Fischetti M. & Toth P. (1997). Modeling and solving the train timetabling problem. *Operations Research*. 50(5), 851-861.
 27. Yan B., Jin J. G., J., Zhu X., Lee D.-H., Wang L., Wang H. Integrated planning of train schedule template and container transshipment operation in seaport railway

- terminals. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*. 2020. 142. 102061.
28. Liu D. Yang H. Dynamic pricing model of container sea-rail intermodal transport on single OD line. *Journal of Transportation Systems Engineering and Information Technology*. 2012. 12(4). 122–127.
 29. Liu D. Yang H. Optimal slot control model of container sea-rail intermodal transport based on revenue management. *Procedia - Social and Behavioral Sciences*. 2013. 96(6). 1250–1259.
 30. Fan Q., Jin Y., Wang W., Yan X. A performance-driven multi-algorithm selection strategy for energy consumption optimization of sea-rail intermodal transportation. *Swarm and Evolutionary Computation*. 2019. 44. 1–17.
 31. Muraev D., Hu H., Rakhmangulov A., Mishkurov P. Multi-agent optimization of the intermodal terminal main parameters by using AnyLogic simulation platform: Case study on the Ningbo-Zhoushan Port. *International Journal of Information Management*. 2021. 57. 102133.
 32. Ambrosino D., Asta V., Crainic T. G. Optimization challenges and literature overview in the intermodal rail-sea terminal. *Transportation Research Procedia*. 2021. 52. 163–170.
 33. Yan B., Zhu X., Lee D.-H., Jin J. G. Transshipment operations optimization of sea-rail intermodal container in seaport rail terminals. *Computers & Industrial Engineering*. 2020. 141. 106296.
 34. De Langen P. W., Chouly A. Hinterland access regimes in seaports. *European Journal of Transport and Infrastructure Research*. 2004. 4(4). P. 361–380.
 35. Yan B., Zhu X., Lee D.-H. Jin J. G., Wang L. Transshipment operations optimization of sea-rail intermodal container in seaport rail terminals. *Computers & Industrial Engineering*. 2020. 141(6):106296.
 36. Hu Q., Wiegmans B., Corman F., Lodewijks G. Integration of inter-terminal transport and hinterland rail transport. *Flexible Services and Manufacturing Journal*. 2019. 31. P. 807–831.

37. Petersen E. R. A structured model of the railway transportation problem. *Transportation Science*. 1982. 16(3), P. 250–263.
38. Taylor C. T. Railway innovation and uncertainty. *R&D Management*. 1982. 12(1), P. 37–48. <https://doi.org/10.1111/j.1467-9310.1982.tb00481.x>.
39. Vandoorne R., & Gräbe P. J. Uncertainty and risk quantification in railway maintenance modelling. *Proceedings of the 5th International Conference on Road and Rail Infrastructure – CETRA 2018: Road and Rail Infrastructure V. University of Zagreb, Faculty of Civil Engineering, Department of Transportation*. 2018. P. 639–645. <https://doi.org/10.5592/CO/cetra.2018.704>.
40. McCartney S., Stittle J. ‘Failing to deliver’— the privatized British rail freight industry. *Public Money & Management*. 2013. 33(5). P. 321–328. <https://doi.org/10.1080/09540962.2013.817115>.
41. Govindan K., Fattahi M. & Keyvanshokoo E. Supply chain network design under uncertainty: A comprehensive review and future research directions. *European Journal of Operational Research*. 2017. 263(1), P. 108–141. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2017.04.009>.
42. Ghofrani F., He Q., Goverde R. M. & Liu X. (2018). Recent applications of big data analytics in railway transportation systems: A survey. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*. 90, P. 226–246.
43. Бутько Т. В., Прохоров В. М., Чехунов Д. М. Інтелектуальне управління сортувальними станціями при перевезеннях небезпечних вантажів на основі багатоцільової оптимізації. *Наука та прогрес транспорту. Вісник Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна*. 2018. № 5. С. 41–52.
44. Lavrukhin O., Kovalov A., Schevcenko V., Kyman A. & Kulova D. (). Construction of an integrated criterion for estimating the consequences of emergencies involving dangerous goods. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2(3 (98)). 2019. P. 25–31. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2019.163442>.
45. Державна служба статистики України. Офіційний вебсайт. URL: <https://www.ukrstat.gov.ua> (дата звернення: 09.07.2024).

46. Pal A. B., Khare D., Mishra P., Singh L. Trend analysis of rainfall, temperature, and runoff data: a case study of Rangoon watershed in Nepal. *International Journal of Studies in Research Technology and Management*. 2017. Vol. 5. P. 21–38.
47. Breitenbach T., Wilkusz B., Rasbach L., Jahnke P. On a method for detecting periods and repeating patterns in time series data with autocorrelation and function approximation. *Pattern Recognition*. 2023. 138. 109355.
48. Peiris S., Hunt R. Revisiting the Autocorrelation of Long Memory Time Series Models. *Mathematics*. 2023. 11(4). 817. DOI: <https://doi.org/10.3390/math11040817>.
49. Sun C. Li H., Song M., Cai D., Zhang B., Hong S. Time pattern reconstruction for classification of irregularly sampled time series. *Pattern Recognition*. 2024. 147. 110075.
50. Yu Y., Ma R., Ma Z. Robformer: A robust decomposition transformer for long-term time series forecasting. *Pattern Recognition*. 2024. 153. 110552.
51. Franq C., Zakoïan J.-M. Bartlett's formula for a general class of nonlinear processes. *Journal of Time Series Analysis*. 2009. 30(4). P. 449–465.
52. Ding Z., Granger C. W. J., Engle R. F. A long memory property of stock market returns and a new model. *Journal of Empirical Finance*. 1993. 1. P. 83–106.
53. Breidt F. J., Crato N., de Lima P. The detection and estimation of long memory in stochastic volatility. *Journal of Econometrics*. 1998. 83. P. 325–348.
54. Ljung G. M., Box G. E. P. On a measure of lack of fit in time series models. *Biometrika*. 1978. 62(2). P. 297–303.
55. Ghaderpour E., Pagiatakis S. D., Mugnozza G. S., Mazzanti P. On the stochastic significance of peaks in the least-squares wavelet spectrogram and an application in GNSS time series analysis. *Signal Processing*. 2024. 223. 109581. <https://doi.org/10.1016/j.sigpro.2024.109581>.
56. Ghaderpour E. JUST: MATLAB and python software for change detection and time series analysis. *GPS Solutions*. 2021. 25(3). 85.
57. Ghaderpour E., Pagiatakis S. D. LSWAVE: A MATLAB software for the least-squares wavelet and cross-wavelet analyses. *GPS Solutions*. 2021. 23(2). 50.

58. Ghaderpour E., Pagiatakis S. D. Least-squares wavelet analysis of unequally spaced and non-stationary time series and its applications *Math. Geoscience*. 2017. 49(7). P. 819–844.
59. Foster G. Wavelet for period analysis of unevenly sampled time series. *Astronomical Journal*. 1996. 112(4). P. 1709–1729.
60. Meraz M., Alvarez-Ramirez J., Rodriguez E. Multivariate rescaled range analysis. *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*. 2022. 589. 126631.
61. Marin-Lopez A., Martínez-Cadena J. A., Martinez-Martinez F., Alvarez-Ramirez J. Surrogate multivariate Hurst exponent analysis of gait dynamics. *Chaos, Solitons & Fractals*. 2023. 172. 113605.
62. Couillard M. & Davison M. A comment on measuring the Hurst exponent of financial time series. *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*. 2005. 348. 404–418.
63. Vogl M. Hurst exponent dynamics of S&P 500 returns: Implications for market efficiency, long memory, multifractality and financial crises predictability by application of a nonlinear dynamics analysis framework. *Chaos, Solitons & Fractals*. 2023. 166. 112884.
64. Yadav V. K., Prasad S. A simulation based optimization of factor-type exponential estimators in sample surveys with coefficients of variation and kurtosis. *Franklin Open*. 2023. Vol. 5. 100050.
65. Younis R., Hakmeh A., Ahmadi Z. MTS2Graph: Interpretable multivariate time series classification with temporal evolving graphs. *Pattern Recognition*. 2024. 152. 110486.
66. Karunasingha D. S. K. Root mean square error or mean absolute error? Use their ratio as well. *Information Sciences*. 2022. 585. P. 609–629.
67. Mason D. M. The Hurst phenomenon and the rescaled range statistic. *Stochastic Processes and their Applications*. 2016. 126(12). 3790–3807.
68. Ircio J., Lojo A., Mori U., Lozano J. A. Mutual information based feature subset selection in multivariate time series classification. *Pattern Recognition*. 2020. 108. 107525.

69. Strogatz S. H. *Nonlinear Dynamics and Chaos: With Applications to Physics, Biology, Chemistry, and Engineering*. 2nd ed. Boca Raton: CRC Press; 2015. 532 p. DOI: <https://doi.org/10.1201/9780429492563>.
70. Wolf A., Swift J. B., Swinney H., Vastano J. A. Determining Lyapunov Exponents From a Time Series. *Physica D: Nonlinear Phenomena*. 1985. 16(3). P. 285–317. DOI: 10.1016/0167-2789(85)90011-9.
71. Негрей В. Я., Шкурин К. М. Развитие теории расчета плана формирования однопутных поездов. *Вестник Белорусского государственного университета транспорта: Наука и транспорт*. 2017. № 2 (35). С. 123–126.
72. Козаченко Д. М., Вернигора Р. В., Горбова О. В. Методи збору даних про функціонування залізничних станцій. *Транспортні системи та технології перевезень : зб. наук. пр. Дніпропетр. нац. ун-ту залізн. трансп. ім. акад. В. Лазаряна*. 2014. Вип. 8. С. 58–64. DOI:10.15802/tsst2014/38087.
73. Музикіна С. І., Музикін М. І., Нестеренко Г. І. Дослідження пропускної спроможності сортувальної станції. *Наука та прогрес транспорту. Вісник Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна*. 2016. 2. С. 47–60.
74. Музикіна Г. І., Болвановська Т. В., Жорова Є. М. Вплив параметрів накопичення вагонів на їх простій на сортувальній станції. *Вісн. Дніпропетр. нац. ун-ту залізн. трансп. ім. акад. В. Лазаряна*. 2008. Вип. 20. С. 198–201.
75. Schwarz M., Sauer C., Daduna H., Szekli R. M/M/1 Queueing systems with inventory. *Queueing Systems*. 2006. 54(1). P. 55–78. DOI: 10.1007/s11134-006-8710-5.
76. Schwarz M., Sauer C., Daduna H., Szekli R. M/M/1 Queueing systems with inventory. *Queueing Systems*. 2006. 54(1). P. 55–78. DOI: 10.1007/s11134-006-8710-5.
77. Singh L. K., Srivastava R. Design and Implementation of G/G/1 Queueing Model Algorithm w.r.t. its Applicability for Internet Gateway Server. *The International Arab Journal of Information Technology*. 2008. 5(4). P. 367–374.
78. Пархоменко Л. О., Прохоров В. М. Уточнення моделі розрахунку плану формування поїздів за рахунок урахування ефекту навантаженості сортувальних

- станцій. *Вісник Приазовського Державного Технічного Університету. Серія: Технічні науки*. 2024. № 48. С. 193–205.
79. Poss M. Robust combinatorial optimization with knapsack uncertainty. *Discrete Optimization*. 2018. 27. P. 88–102.
80. Пархоменко Л. О., Прохоров В. М., Калашнікова Т. Ю. Удосконалення технології управління місцевою роботою дільниці в умовах невизначеності на основі робастної оптимізації. *Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті*. 2024. № 3. С. 3–12.
81. Marseguerra M., Zio E., Martorell S. Basics of genetic algorithms optimization for RAMS applications. *Reliability Engineering & System Safety*. 2006. 91(9). P. 977–991.
82. Панченко Н. Г. Формування системи ризик-менеджменту на залізничному транспорті України. *Агросвіт*. 2018. № 22. С. 34–41.
83. Кириченко Г. І. Аналіз інформаційних технологій управління процесами доставки вантажів на залізниці. *Проблеми та перспективи розвитку транспортних систем в умовах реформування залізничного транспорту: управління, економіка і технології: матеріали VI Міжнар. наук.-практ. конф.* Київ, 2013. С. 160–162.
84. Кириченко Г. І., Габа В. В., Висоцька Г. С. Автоматизований облік часу затримки вагонів та вантажів на підходах до станцій призначення. *Залізничний транспорт України*. 2011. № 1. С. 30–32.
85. Кириченко Г. І., Стрелко О. Г., Бердниченко Ю. А., Макарова О. О. Організація роботи сортувальної станції в умовах автоматизації. *Збірник наукових праць Державного економіко-технологічного університету транспорту. Сер.: Транспортні системи і технології*. 2013. Вип. 23. С. 150–154.
86. Корнійчук К. С. Переваги впровадження електронного документообігу на Укрзалізниці. *Культура та інформаційне суспільство XXI століття : матеріали всеукр. наук.-теорет. конф. молодих учених, м. Харків 21–22 квітня 2016 р.* Харків: ХДАК, 2016. С. 342–344.
87. Panchenko S. V., Butko T. V., Prokhorchenko A. V., Parkhomenko L. O. Formation of an automated traffic capacity calculation system of rail networks for freight flows of

mining and smelting enterprises. *Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu*. 2016. 2. P. 93–99.

88. Марценюк Л. В. Аналіз обігу вантажних вагонів та шляхи його зменшення. *Роль інновацій у підвищенні наявного потенціалу країни: матеріали науково-практ. конф., м. Тернопіль, 14–15 грудня 2011 р.* Крок, 2011. С. 49–50.
89. Козаченко Д. М. Дослідження ефективності заходів автоматизації управління швидкістю скочування відцепів на сортувальних гірках. *Вагонний парк*. 2010. Вип. 12. С. 4–8.
90. Бочаров О. П., Міхальов Г. О., Мороз В. П., Шиш В. О. Динамічна модель сортувальної станції та її роль в подальшій оптимізації процесу перевезень *Інформаційно-керуючі системи на транспорті*. 2011. № 5. С. 74–76.
91. Кириченко Г. І. Проблематика застосування інформаційних технологій в управлінні процесами доставки вантажу. *Проблеми транспорту*. Київ: НТУ, 2012. Вип. 9. С. 17–27.
92. Кириченко Г. І. Прогнозування процесів надходження вагонопотоків на стики залізничного полігону. *Регіональний міжвузівський збірник наукових праць «Системні технології»*. 2001. 3(14). С. 120–128.
93. Кириченко Г. І. Інтелектуальна система управління процесом доставки вантажу. *Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті*. 2015. 5(114). С. 3–6.
94. Пархоменко Л. О., Чехунов Д. М. Дослідження показників вантажних перевезень в контексті обробки вагонопотоків із небезпечними вантажами. *Матеріали Міжнародної науково-практичної Internet-конференції «Моделювання та інформаційні технології в науці, техніці та освіті» (21–22 листопада 2018 р.)*. Харків, 2018. С. 171–177. DOI 10.1016/j.procs.2019.01.111.
95. Бутько Т. В., Пархоменко Л. О. Формування методів і моделей управління експлуатаційною роботою залізничної транспортної системи в умовах ризиків. *Матеріали двадцятої науково-практичної Міжнародної конференції «Міжнародна транспортна інфраструктура, індустриальні центри та корпоративна логістика», NTI. 2024 (Харків, 6–7 червня 2024 р.)*. Харків, 2024. С. 45–47.

96. Іващук В. Р., Кириченко Г. І. Логістичні технології управління процесами перевезень вантажів на залізницях. *Матеріали XIII Міжнародної науково-практичної конференції «Ринок послуг комплексних транспортних систем та прикладні проблеми логістики»*. 2011. С. 87–92.
97. Prokhorchenko A., Parkhomenko L., Kyman A., Matsiuk V., Stepanova J. Improvement of the technology of accelerated passage of low-capacity car traffic on the basis of scheduling of grouped trains of operational purpose. *Procedia Computer Science*. 2019. Vol. 149. P. 86–94.
98. Пархоменко Л. О., Прохоров В. М., Калашнікова Т. Ю., Овсянніков Д. О. Формування моделі управління пріоритетністю обробки вагонів на технічних станціях в умовах невизначеності. *Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті*. 2024. № 1. С. 45–54.
99. Кириченко Г. І., Овчаренко С. М. Розробка методу контрольно-часових точок для контролю виконання графіків доставки вантажів. *Проблеми транспорту*. 2013. 10. С. 112–118.
100. Кириченко Г. І., Габа В. В., Висоцька Г. С. Автоматизований облік часу затримки вагонів та вантажів на підходах до станцій призначення. *Залізничний транспорт України*. 2011. № 1. 30–32.
101. Chen L.-S., Hsu C.-C., Chen L.-F. Developing a robust classifier for fault detection in production environment. *IFAC Proceedings Volumes*. 2009. 42(4). 270–275.
102. Adegboye O. R., Ülker E. D., Feda A. K., Agyekum E. B., Mbasso W. F., Kamel S. Enhanced multi-layer perceptron for CO₂ emission prediction with worst moth disrupted moth fly optimization (WMFO). *Heliyon*. 2024. 10(11). e31850.
103. Reza A. F., Singh R., Verma R. K., Singh A., Ahn Y.-H., Ray S. S. An integral and multidimensional review on multi-layer perceptron as an emerging tool in the field of water treatment and desalination processes. *Desalination*. 2024. 586. 117849.
104. Hasan M. M., Rahman M. M., Islam M. S., Chan W. H., Alginahi Y. M., Kabir M. N., Bakar S. A., Ramasamy D. Artificial Neural Network Modeling for Predicting Thermal Conductivity of EG/Water-Based CNC Nanofluid for Engine Cooling Using

- Different Activation Functions. *Frontiers in Heat and Mass Transfer*. 2024. 22(2). 537–556.
105. Declercq F., De Smedt P., De Keyser R. A Neural Model Based Predictive Control Toolbox for MATLAB. *IFAC Proceedings Volumes*. 1997. 30(4). 305–310.
 106. Zhang W., Liu F., Nguyen C.M., Ou Yang Z. L., Ramasamy S., Foo C.-S. Training neural networks with classification rules for incorporating domain knowledge. *Knowledge-Based Systems*. 2024. 294. 111716.
 107. Twomey J. M., Smith A. E. Performance measures, consistency, and power for artificial neural network models. *Journal of Mathematical and Computer Modelling*. 1995. 21. 243–258.
 108. Turkoglu B., Kaya E. Training multi-layer perceptron with artificial algae algorithm. *Engineering Science and Technology, an International Journal*. 2020. 23(6). 1342–1350.
 109. Guarnaccia C., Quartieri J., Tepedino C., Iliev S., Popova S. Public Transportation Energy Consumption Prediction by means of Neural Network and Time Series Analysis Approaches. In *6th International Conference on Automotive and Transportation Systems (ICAT '15). Conference held in June 2015*. 2015. P. 64–69.
 110. Науменко П. П., Миненко В. Д., Землянов В. Б. АСК ВП УЗ як основа інтеграції автоматизованих систем управління вантажними перевезеннями залізничного транспорту України. *Вісник Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна*. 2007. Вип. 17. С. 35–40.
 111. Adam F., Fahy M., Murphy, C. A Framework for the Classification of DSS Usage Across Organisations. *Decision Support Systems*. 1998. 22(1). 1–14.
 112. Csáki C., Adam F. DSS Requirements to Support the Regulated Decision Making Process of Public Procurement. *Journal of Decision Systems*. 2010. 19(4). 439–464. <https://doi.org/10.3166/jds.19.439-464>.
 113. Моніторинг процесів доставки вантажів методом призначення контрольно-часових точок / О. Л. Петрашевський, Г. І. Кириченко, О. В. Алексєєнко та ін. *Вісник Національного транспортного університету*. 2014. Вип. 29. 308–317.

114. Кириченко Г. І., Овчаренко С. М. Розробка методу контрольно-часових точок для контролю виконання графіків доставки вантажів. *Проблеми транспорту*. 2013. 10. С. 112–118.
115. Кириченко Г. І. Методика створення інтелектуальної автоматизованої системи управління доставкою вантажів на залізниці. Наука та прогрес транспорту. *Вісник Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту*. 2017. 68(2). С. 46–56.
116. Ломотько Д. В., Ярмач Г. М. Удосконалення переробки вантажів залізничним транспортом в умовах системи транспортно-експедиційного обслуговування. *Збірник наукових праць Українського державного університету залізничного транспорту*. 2016. Вип. 161. С. 5–13.
117. Пасічник В. І., Приймук О. Р., Левіщенко О. С. Техніко-економічні аспекти міждержавних перевезень. *Вісник Національного транспортного університету*. 2013. № 28. С. 365–370.
118. Кириченко Г. І., Бердниченко Ю. А. Складові інформаційної моделі перевізного процесу вантажних перевезень залізничного транспорту. *Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті*. 2021. № 3. С. 12–17.
119. Ponsi F., Bassoli E., Buratti N., Vincenzi L. Parameter estimation and uncertainty quantification of a fiber-reinforced concrete model by means of a multi-level Bayesian approach. *Construction and Building Materials*. 2024. 438. 136994.
120. Kavya R., Christopher J., Panda S. A new belief interval-based total uncertainty measure for Dempster-Shafer theory. *Information Sciences*. 2023. 642. 119150.
121. Hao K., Bilonis I. An information field theory approach to Bayesian state and parameter estimation in dynamical systems. *Journal of Computational Physics*. 2024. 512. 113139.
122. Zhao Q., Liu F., Qiao W. Evaluating industrial heritage value using cloud theory and Dempster–Shafer theory. *Journal of Cultural Heritage*. 2024. 68. 364–374.
123. Höhle U. On the mathematical foundations of fuzzy set theory. *Fuzzy Sets and Systems*. 2022. 444. 1–9.

124. Jiroušek R., Kratochvíl V., Shenoy P. P. On conditional belief functions in directed graphical models in the Dempster-Shafer theory. *International Journal of Approximate Reasoning*. 2023. 160. 108976.
125. Benalla M., Achchab B., Hrimech H. On the computational complexity of Dempster's Rule of combination, a parallel computing approach. *Journal of Computational Science*. 2021. 50. 101283.
126. Surathong S., Auephanwiriyaikul S., TheeraUmpon N. Incorporating fuzzy sets into Dempster Shafer theory for decision fusion. *JP Journal of Heat and Mass Transfer*. 2018. 15(Special Issue 3). P. 299-309.
127. Пархоменко Л. О., Прохоров В. М., Калашнікова Т. Ю., Кофанов О. В. Формування моделі ризику в задачі забезпечення дотримання строку доставки вантажів в умовах невизначеності із використанням теорії нечітких множин та теорії Демпстера-Шафера. *Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті*. 2024. № 2. С. 81–90.
128. Licciardello R., Adamko N., Deleplanque S., Hosteins P., Liu R., Peterson A., Wahlborg M., Zat'Ko M., Pellegrini P. Integrazione di impianti merci, rete e modelli di ottimizzazione per l'esercizio in tempo reale degli impianti. *Scienza e tecnica*. 2020. 6. P. 417–440.
129. Daganzo C. F. Static blocking at railyards: Sorting implications and track requirements. *Transportation Science*. 1986. 20(3). P. 189–199.
130. Shi T., Zhou X. A mixed integer programming model for optimizing multi-level operations process in railroad yards. *Transportation Research Part B: Methodological*. 2015. 80. 19–39.
131. Boysen N., Flidner M., Jaehn F., Pesch E. Shunting yard operations: Theoretical aspects and applications. *European Journal of Operational Research*. 2012. 220(1). 1–14.
132. Yagar S., Saccomanno F., Shi Q. An efficient sequencing model for humping in a rail yard. *Transportation Research Part A: General*. 1983. 17(4). P. 251–262.
133. Твердохліб Ю., Шатунов Д., Пархоменко Л. Організація роботи сортувальної станції в умовах потенційних ризиків та перевезення небезпечних вантажів. *Тези*

доповідей 4-ї Міжнародної науково-технічної конференції «Інтелектуальні транспортні технології», ІТТ. 2023 (Харків, 27–28 листопада 2023 р.). Харків, 2023. С. 64–65.

134. Бутко Т. В., Пархоменко Л. О., Топчій А. В. Формалізація технології функціонування сортувальної станції на основі ризик-менеджменту. *Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті*. 2022. 4. С. 28–32.
135. Бутко Т. В., Прохоров В. М., Чехунов Д. М. Технологія інтелектуального управління сортувальною станцією на основі багатоцільової оптимізації із використанням генетичних алгоритмів. *Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті*. 2018. № 4. С. 45–55.
136. Панченко С. В., Бутко Т. В., Прохоров В. М., Пархоменко Л. О. Удосконалення технології організації вагонопотоків шляхом формування автоматизованої системи розрахунку і забезпечення виконання плану формування поїздів. *Вісник Східноукраїнського національного університету імені Володимира Даля*. 2017. 3. С. 136–142.
137. Prokhorchenko A., Panchenko A., Parkhomenko L., Nesterenko H., Muzykin M., Prokhorchenko H., Kolisnyk A. Forecasting the estimated time of arrival for a cargo dispatch delivered by a freight train along a railway section. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2019. 3/3(99). P. 30–38.
138. Sahu B. R. B., Bhurjee A. K., Kumar P. Efficient solutions for vector optimization problem on an extended interval vector space and its application to portfolio optimization. *Expert Systems with Applications*. 2024. 249(Part B). 123653.
139. Shi R., Lee K.Y. Multi-Objective Optimization of Electric Vehicle Fast Charging Stations with SPEA-II. *IFAC-PapersOnLine*. 2015. 48(30). 535–540.
140. Freitas A. Efficient user-oriented Pareto fronts and Pareto archives based on spatial data structures. *Swarm and Evolutionary Computation*. 2021. 65. 100915.
141. Dolatnezhadsomarin A., Khorram E., Yousefikhoshbakht M. Numerical algorithms for generating an almost even approximation of the Pareto front in nonlinear multi-objective optimization problems. *Applied Soft Computing*. 2024. 112001. <https://doi.org/10.1016/j.asoc.2024.07.018>.

142. De Almeida A.T. Multicriteria decision model for outsourcing contracts selection based on utility function and ELECTRE method. *Computers & Operations Research*. 2007. 34(12). 3569–3574.
143. Rabušić L., Chromková M. B.-E. Hakim's preference theory in the Czech context. *Czech Demography*. 2007. 2. 46–55. Republished in 2008, volume 2.
144. Vranas P. B. M. Gigerenzer's normative critique of Kahneman and Tversky. *Cognition*. 2000. 76(3). 179–193.
145. Козаченко Д. М., Коробйова Р. Г., Германюк Ю. М. Організація роботи сортувальної станції : навч. посіб. для ВНЗ. Львів : СПОЛОМ, 2023. 142 с.
146. Практичні рекомендації щодо складання технологічного процесу роботи сортувальної станції. ЦД-0081 : затв. наказом Укрзалізниці від 22.12.2009 р. № 715-Ц. Київ : ТОВ «НВП Поліграфсервіс», 2010. 230 с.
147. Parkhomenko L., Khodakivskyi O., Khodakivska Y., Kuzmenko O., Pakalnis A. Improvement of the organization of operation of the Ukrainian railway transport on the basis of the idea of unification of the automated freight and passenger transportation control system. «*Transport Means*» – *Proceedings of the International Conference (October 2019). Kaunas University of Technology*. 2019. P. 859–861.
148. Butko T. V., Prokhorov V. M., Parkhomenko L. O., Prokopov A. O. Improvement of technology of passenger intermodal transportation with involvement of railway transport in the conditions of tourism development. *Science and Transport Progress. Bulletin of Dnipropetrovsk National University of Railway Transport*. 2021. № 1 (91). P. 37–50. DOI: 10.15802/stp2021/228106.
149. Pagliara F., Valeri E., de Abreu e Silva J. Is there an impact of High Speed Rail on tourism? Intervento presentato al convegno 13th World Conference on Transport Research tenutosi a Rio De Janeiro nel 15-18 luglio (13th WCTR). 2013. P. 1–16.
150. Li Z., Hensher D. A. Crowding and public transport: A review of willingness to pay evidence and its relevance in project appraisal. *Transport Policy*. 2011. Vol. 18. Iss. 6. P. 880–887.

151. Gottschalk P. G., Dunn J. R. The five-parameter logistic : A characterization. *Analytical Biochemistry*. 2005. Vol. 343. Iss. P. 54–65. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ab.2005.04.035>.
152. 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. 1. Р. 31–37. DOI: 10.18664/iksz.v28i1.276341.
153. Пархоменко Л. О., Серпокрилов В. Ю., Коваленко Д. М. Аналіз динаміки пасажиропотоків по Україні в умовах швидкісних перевезень. *Збірник наукових праць Українського державного університету залізничного транспорту*. 2017. (173). С. 143–148.
154. Pujaru K., Adak S., Kar T. K., Patra S., Jana S. A Mamdani fuzzy inference system with trapezoidal membership functions for investigating fishery production. *Decision Analytics Journal*. 2024. 11. 100481.
155. Pálková A., Mašek J. Fuzzy Logic as a Decision-Making Tool for Transport Request Selection. *Transportation Research Procedia*. 2024. 77. 116–122.
156. Wang X.-H., Zhang D.-Q. Modeling methods for deep fuzzy inference systems based on feature selection. *Information Sciences*. 2024. 677. 120958.
157. Varshney A., Goyal V. Re-evaluation on fuzzy logic controlled system by optimizing the membership functions. *Materials Today: Proceedings*. 2023. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2023.04.011>.
158. Bisht G., Pal A. K. Three-way decisions based multi-attribute decision-making with utility and loss functions. *European Journal of Operational Research*. 2024. 316(1). 268–281.
159. Розробка процедури формування схеми маршрутів поїздів для автоматизованої системи управління швидкісними пасажирськими перевезеннями / Л. О. Пархоменко, В. М. Прохоров, Т. Ю. Калашнікова та ін. *Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті*. 2021. 3(26). С. 18–26.

160. Farrando R., Farhi N., Christoforou Z., Urban A. A mathematical model for a two-service skip-stop policy with demand-dependent dwell times. *Journal of Rail Transport Planning & Management*. 2024. 31. 100461.
161. Abdelhafiez E. A., Salama M. R., Shalaby M. A. Minimizing passenger travel time in URT system adopting skip-stop strategy. *Journal of Rail Transport Planning & Management*. 2017. 7(4). 277–290.
162. Abdelhafiez E. A., Salama M. R., Shalaby M. A. Minimizing passenger travel time in URT system adopting skip-stop strategy. *Journal of Rail Transport Planning & Management*. 2017. 7(4). 277–290.
163. Suh W., Chon K. S., Rhee S. M. Effect of skip-stop policy of a Korean subway system. *Transportation Research Record*. 2007. 1793. 33–39.
164. Yuan Y., Li S., Liu R., Yang L., Gao Z. Decomposition and approximate dynamic programming approach to optimization of train timetable and skip-stop plan for metro networks. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*. 2023. 157. 104393.
165. Peftitsi S., Jenelius E., Cats O. Evaluating skip-stop policy in urban rail transit systems based on passenger cost. *Journal of Public Transportation*. 2023. 25. 100064.
166. Jomnonkwao S., Champahom T., Ratanavaraha V. Methodologies for Determining the Service Quality of the Intercity Rail Service Based on Users' Perceptions and Expectations in Thailand. *Sustainability*. 2020. 12(10). 4259. <https://doi.org/10.3390/su12104259>.
167. Harman R., Rosa S. Mixed-integer linear programming for computing optimal experimental designs. *Journal of Statistical Planning and Inference*. 2024. 234. 106200.
168. Mo P., Yao Y., Li P., Wang Y., Liu Z., D'Ariano A. Synergising urban freight transportation in passenger-oriented transit corridors: An efficient Mixed-Integer Linear Programming approach. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*. 2024. 163. 104644.
169. Пархоменко Л. О., Лавренюк В. О. Розроблення нечіткої моделі прогнозування кореспонденцій пасажирів у швидкісному русі на основі

принципів просторової взаємодії. *Збірник наукових праць Українського державного університету залізничного транспорту*. 2016. 164. С. 15–22.

170. Пархоменко Є. О., Пархоменко Л. О. Формування інформаційно-керуючої системи стратегічного планування швидкісних пасажирських перевезень на залізничному транспорті. *Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті*. 2018. 5. С. 3–9.
171. Scherrer W., Deistler M. Vector autoregressive moving average models. *Handbook of Statistics*. 2019. Vol. 41. P. 145–191.
172. Pereira L., Driemeier L. Wasserstein generative adversarial networks for topology optimization. *Structures*. 2024. 67. 106924.
173. Li P., Dai Z., Rui Y., Ling J., Liu J., Zhai Y., Fan J. Generative adversarial network for optimization of operational parameters based on shield posture requirements. *Automation in Construction*. 2024. 165. 105553.
174. Pekmezci M., Genc Y. Evaluation of SSIM loss function in RIR generator GANs. *Digital Signal Processing*. 2024. 154. 104685.
175. Yilmaz B., Korn R. A Comprehensive guide to Generative Adversarial Networks (GANs) and application to individual electricity demand. *Expert Systems with Applications*. 2024. 250. 123851.
176. Noordin N. H., Eu P. S., Ibrahim Z. FPGA Implementation of Metaheuristic Optimization Algorithm. *e-Prime - Advances in Electrical Engineering, Electronics and Energy*. 2023. 6. 100377.
177. Tagiltseva J., Vasilenko M., Kuzina E., Drozdov N., Parkhomenko R., Prokopchuk V., Skichko E., Bagiryan V. The economic efficiency justification of multimodal container transportation. *Transportation Research Procedia*. 2022. 63. 264–270.
178. Feng X., Song R., Yin W., Yin X., Zhang, R. Multimodal transportation network with cargo containerization technology: Advantages and challenges. *Transport Policy*. 2023. 132. 128–143.
179. Li X., Fan Y., Wu L. CO2 emissions and expansion of railway, road, airline and inland waterway networks over the 1985–2013 period in China: A time series analysis. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*. 2017. 57. 130–140.

180. Zadorozhniy V., Chislov O., Kolesnikov M., Bakalov M., Khan V. Methodological principles of modeling and intellectualization of logistic interaction in the «railway station-port» system. *Transportation Research Procedia*. 2022. 63. 1690–1699.
181. Zhang B., Xia Y., Liang Y. Effect of transfer costs on traffic dynamics of multimodal transportation networks. *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*. 2023. 623. 128848.
182. Wang X., Meng Q. The impact of landbridge on the market shares of Asian ports. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*. 2011. 47(2). 190–203.
183. Lévêque C., Bécuwe S., Blancheton B. Railways and port traffic: The case of France during the first wave of globalization. *Research in Transportation Business & Management*. 2024. 53. 101110.
184. Chen L. H., Xia A. Stein's method, Palm theory and Poisson process approximation. *Annals of probability*. 2004. Vol. 32. No. 3B. P. 2545–2569.
185. Kayid M., Izadkhah S. Characterizations of the exponential distribution by the concept of residual life at random time. *Statistics & Probability Letters*. 2015. 107. 164–169.
186. MaCurdy T. E., Ryu K. Equivalence results in chi-square tests. *Economics Letters*. 2003. 80(3). 329–336.
187. McHugh M. L. The Chi-square test of independence. *Biochemia Medica*. 2013. 23(2). 143–149. <https://doi.org/10.11613/BM.2013.018>.
188. Brush S. G. A history of random processes. *Archive for History of Exact Sciences*. 1968. 5(1). 1-36.
189. Tse K.-K. Some Applications of the Poisson Process. *Applied Mathematics*. 2014. 5(19). 3011–3017. <https://doi.org/10.4236/am.2014.519288>.
190. Doob J. Stochastic Processes and Statistics. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*. 1934. 20(6). 376–379.
191. Bisaglia L., Procidano I. On the power of the Augmented Dickey–Fuller test against fractional alternatives using bootstrap. *Economics Letters*. 2002. 77(3). 343–347.

192. Kwiatkowski D., Phillips P. C. B., Schmidt P., Shin Y. Testing the null hypothesis of stationarity against the alternative of a unit root. *Journal of Econometrics*. 1992. 54(1–3). 159–178.
193. Parzen E. On Estimation of a Probability Density Function and Mode. *The Annals of Mathematical Statistics*. 1962. 33(3). 1065–1076.
194. Botev Z. I., Grotowski J. F., Kroese D. P. Kernel density estimation via diffusion. *Annals of Statistics*. 2010. 38(5). 2916–2957.
195. Бутько Т. В., Колісник А. В., Пархоменко Л. О. Удосконалення організації взаємодії залізничних вузлів та портів при контейнерних перевезеннях. *Тези доповідей 1-ї Міжнародної науково-технічної конференції «Інтелектуальні транспортні технології» (Трускавець-Харків, 24-30 січня 2020 р.)*. Харків: УкрДУЗТ, 2020. С. 13.
196. Пархоменко Л. О., Мансурова З. Удосконалення технології роботи залізничного і морського транспорту на засадах логістики. *Тези доповідей 3-ї Міжнародної науково-технічної конференції «Інтелектуальні транспортні технології», ІТТ. 2022 (Харків, 22–23 листопада 2022 р.)*. Харків, 2022. С. 312–317.
197. Dell'Amico M., Hadjidimitriou S. Innovative Logistics Model and Containers Solution for Efficient Last Mile Delivery. *Procedia - Social and Behavioral Sciences*. 2012. 48. 1505–1514.
198. Пархоменко Л. О., Прохоров В. М., Калашнікова Т. Ю., Шандер О. Е. Розроблення СППР для управління процесом формування контейнерних поїздів у рамках системи інтермодальних перевезень. *Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті*. 2023. № 3. С. 29–42. DOI: 10.18664/iksz.v28i3.290142.
199. Butko T., Prokhorov V., Kolisnyk A., Parkhomenko L. Devising an automated technology to organize the railroad transportation of containers for intermodal deliveries based on the theory of point processes. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2020. 1/3(103). P. 6–12.
200. Rail Operators Enhance Container Rail Shuttle Network Between Rotterdam and Kehl/Strasbourg. Container News, 29 July 2022. URL: <https://container-news.com/rail->

operators-enhance-container-rail-shuttle-network-between-rotterdam-and-kehl-strasbourg/.

201. Fathi-Vajargah B., Khoshkar-Foshtomi H. Simulating of poisson point process using conditional intensity function (Hazard function). *International Journal of Advanced Statistics and Probability*. 2013. 2(1). P. 34–41. <https://doi.org/10.14419/ijasp.v2i1.2165>.
202. Daley D. J. and Vere-Jones D. 2003. An Introduction to the Theory of Point Processes, 2nd. Springer-Verlag New York.
203. Ma X., Xu F., Liu Z. A method for evaluation of the probability density function of white noise filtered non-Gaussian stochastic process. *Mechanical Systems and Signal Processing*. 2024. 211. 111242.
204. Lysenko A., Shikov E., Bochenina K. Temporal point processes for purchase categories forecasting. *Procedia Computer Science*. 2019. 156. 255–263.
205. MSC вводить штрафи для клієнтів за зрив вантажоперевезень. Центр транспортних стратегій, 11 квіт. 2012. <https://cfts.org.ua/news/43645>.
206. Zadorozhniy V., Chislov O., Kolesnikov M., Bakalov M., Khan V. Methodological principles of modeling and intellectualization of logistic interaction in the «railway station-port» system. *Transportation Research Procedia*. 2022. 63. 1690–1699.
207. Butko T., Kostiennikov O., Parkhomenko L., Prokhorov V., Bogomazova G. Forming an automated technology to manage freight transportation along a direction. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2019. 1/13(97). P. 6–13. DOI: 10.15587/1729-4061.2019.156098.
208. Zamanzade E., Mahdizadeh M., Samawi H. Efficient estimation of cumulative distribution function using moving extreme ranked set sampling with application to reliability. *AStA Advances in Statistical Analysis*. 2020. 104(2). 183–210. <https://doi.org/10.1007/s10182-020-00368-3>.
209. World seaborne trade – UNCTAD Handbook of Statistics 2023. UNCTAD, 2023. <https://hbs.unctad.org/world-seaborne-trade/>.
210. Freight transported in containers - statistics on unitisation - Statistics Explained. URL: <https://ec.europa.eu/eurostat/statistics->

explained/index.php?title=Freight_transported_in_containers_-_statistics_on_unitisation&oldid=533691 (дата звернення: 29.07.2024).

211. Nair R., Miller-Hooks E. D., Mahmassani H. S., Arcot V. C., Kuo A. Y., Zhang K., Kozuki A. T. C. Y., Ludvigsen J. Market Potential for International Rail-Based Intermodal Services in Europe. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*. 2008. 2066 (1). 21–30. doi: <https://doi.org/10.3141/2066-03>.
212. Parkhomenko L., Butko T., Prokhorov V., Kalashnikova T., Golovko, T. Building a model for planning rapid delivery of containers by rail under the conditions of intermodal transportation based on robust optimization. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2022. 5/3(119). P. 6–16. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2022.265668>.
213. Kückelmann A. Entwicklung und Bau des CargoSprinters. *ETR. Eisenbahntechnische Rundschau*. 1997. 46(10). P. 641–644.
214. Пархоменко Л. О., Калашнікова Т. Ю., Прохоров В. М. Підвищення інтероперабельності залізничної транспортної системи України при здійсненні інтермодальних контейнерних перевезень на основі технології Metrocargo™. *The 4th International scientific and practical conference «Innovations and prospects of world science» (December 1-3, 2021) Perfect Publishing, Vancouver, Canada*. 2021. С. 312–317.
215. Бутько Т. В., Прохоров В. М., Пархоменко Л. О., Прокопов А. О. Перспективи розвитку вантажних інтермодальних перевезень в Україні з точки зору побудови нових залізничних шляхів з Європейською шириною колії. *Тези доповідей 2-ї Міжнародної науково-технічної конференції «Інтелектуальні транспортні технології», ІТТ. 2021 (Харків, 27–29 квітня 2021 р.)*. Харків, 2021. С. 312–317.
216. Бутько Т. В., Пархоменко Л. О., Артемов Е. М., Лагно О. С. Методи організації вантажних залізничних перевезень на основі ризик-орієнтованих технологій. *Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті*. 2023. № 4. С. 38–45. DOI: 10.18664/ikszt.v28i4.296468.

217. Kabourlasos V., Papakostas G., Pachidis T. P., Athinellis A. Intervals' Numbers (INs) interpolation/extrapolation. In: Fuzzy Systems (FUZZ), 2013 IEEE International Conference on. July 2013. DOI: 10.1109/FUZZ-IEEE.2013.6622318.
218. Arslan A. N., Poss M. Uncertainty reduction in robust optimization. *Operations Research Letters*. July 2024;55:107131.
219. Ben-Tal A., Nemirovski A., Roos C. Extended Matrix Cube Theorems with Applications to μ -Theory in Control. *Mathematics of Operations Research*. 2003. 28 (3). 497–523. doi: <https://doi.org/10.1287/moor.28.3.497.16392>.
220. Ben-Tal A., Goryashko A., Guslitzer E., Nemirovski A. Adjustable robust solutions of uncertain linear programs. *Mathematical Programming*. 2004. 99 (2). 351–376. doi: <https://doi.org/10.1007/s10107-003-0454-y>.
221. Poss M. Robust combinatorial optimization with variable cost uncertainty. *European Journal of Operational Research*. 2014. 237(3). 836–845.
222. Poss M. Robust combinatorial optimization with knapsack uncertainty. *Discrete Optimization*. 2018. 27. 88–102.
223. Álvarez-Miranda E., Ljubic I., Toth P. A note on the Bertsimas & Sim algorithm for robust combinatorial optimization problems. *4OR*. 2013. 11(4). P. 349–360.
224. Chu K. H., Hashim M. A. Can the Bass innovation diffusion model describe adsorption breakthrough curves of pharmaceutical contaminants? *Green Chemical Engineering*. 2024. 5(2). P. 145–149.
225. Han Z., Tang Z., He B. Improved Bass model for predicting the popularity of product information posted on microblogs. *Technological Forecasting and Social Change*. 2022. 176. 121458.
226. Jagannathan R., Matsa D.A., Meier I., Tarhan V. Why do firms use high discount rates? *Journal of Financial Economics*. 2016. 120(3). 445–463.
227. Marchioni A., Magni C.A. Investment decisions and sensitivity analysis: NPV-consistency of rates of return. *European Journal of Operational Research*. 2018. 268(1). P. 361–372.
228. Sokolov M. V. NPV, IRR, PI, PP, and DPP: A unified view. *Journal of Mathematical Economics*. 2024. 114. 102992.

Додаток А

Акти впровадження

ЗАТВЕРДЖУЮ:

Перший заступник директора виконавчого
регіональної філії «Південна залізниця»

АТ «Укрзалізниця»

Михайло КУЗЬМЕНКО



20 24 року

АКТ

**про впровадження результатів докторської дисертаційної роботи
на тему: «Розвиток теорії управління експлуатаційною роботою залізничної
системи в умовах невизначеностей і ризиків»**

Пархоменко Лариси Олексіївни

Складено комісією у складі:

Голова: Начальник виробничого підрозділу «Служба роботи станцій»
регіональної філії «Південна залізниця» АТ «Укрзалізниця» -
Микола ТЕРЕЩЕНКО.

Члени комісії: Заступник начальника виробничого підрозділу «Служба роботи
станцій» регіональної філії «Південна залізниця»
АТ «Укрзалізниця» - Віталій КАТАСОНОВ;

заступник начальника технічного відділу Харківського центру
управління рухом АТ «Укрзалізниця» – Ірина ПАРХОМЕНКО.

Комісія визначила фактичне впровадження таких результатів дисертаційної
роботи доцента Л.О. Пархоменко:

– модель, яка реалізує уточнення цільового критерію, за рахунок урахування
залежності витрат вагоногодин на переробку вагонопотоків від рівня завантаженості
сортувальної станції. Уточнення моделі дозволило знизити реальні технологічні

витрати на 405,71 вагоно-годин, що відповідає 3,5% від загальних витрат на накопичення та переформування поїздів;

- вирішена задача планування місцевої роботи на залізничній дільниці в умовах невизначеності, обумовленої коливаннями обсягів місцевої роботи по станціях дільниці;

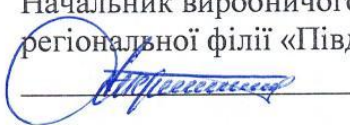
- реалізована математична модель стохастичної робастної оптимізації. Обсяги місцевої роботи в рамках цієї моделі запропоновано представляти за допомогою стохастичних інтервальних чисел, які використовують статистичні дискретні розподіли імовірності. У разі відсутності статистичних даних для представлення стохастичних змінних було запропоноване використання біноміального розподілу.

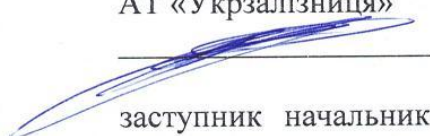
- доведено ефективність використання запропонованої моделі в умовах невизначеності;

Виходячи з вищезазначеної необхідності системних змін в управлінських підходах та технологіях, було впроваджено моделі оперативного планування на основі векторної оптимізації, отриманий позитивний ефект який дозволяє зменшити простій вагонів на технічній станції в середньому на 7.7 %, що обумовлена раціоналізацією процесу формування составів.

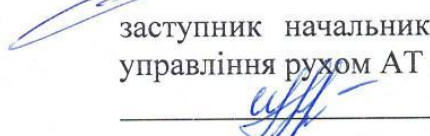
Комісія вважає надані розробки актуальними та такими, що слід рекомендувати до подальшого впровадження в роботі технічних та сортувальних станцій.

Голова комісії:

Голова: Начальник виробничого підрозділу «Служба роботи станцій» регіональної філії «Південна залізниця» АТ «Укрзалізниця» -

 Микола ТЕРЕЩЕНКО.

Члени комісії: заступник начальника виробничого підрозділу «Служба роботи станцій» регіональної філії «Південна залізниця» АТ «Укрзалізниця»


Віталій КАТАСОНОВ;

заступник начальника технічного відділу Харківського центру управління рухом АТ «Укрзалізниця»


Ірина ПАРХОМЕНКО.

ЗАТВЕРДЖУЮ

Генеральний директор

ТОВ «БРУКЛІН-КИЇВ»

Олексій ІЗКУЛІН



АКТ

**впровадження результатів докторської дисертаційної роботи
на тему: «Розвиток теорії управління експлуатаційною роботою
залізничної системи в умовах невизначеностей і ризиків»**

Пархоменко Лариси Олексіївни

Цим актом засвідчуємо, що в практичній діяльності ТОВ «Бруклін-Київ» використані наступні результати дисертаційної роботи Пархоменко Лариси Олексіївни на тему "Розвиток теорії управління експлуатаційною роботою залізничної системи в умовах невизначеностей і ризиків":

- модель управління процесом формування контейнерних поїздів в рамках системи міжнародних інтермодальних перевезень;
- модель управління швидкими залізничними контейнерними перевезеннями в умовах невизначеності на основі робастної оптимізації.

Впровадження результатів даного наукового дослідження дозволило:

- оптимізувати процеси формування і просування контейнерних поїздів, що забезпечило скорочення доставки контейнерів до порту залізничним транспортом в середньому на 4,4%;

— зменшити середню тривалість перебування контейнера на припортових контейнерних терміналах на 6,17 години.

Завдяки впровадженню зазначених результатів компанія змогла підвищити рівень обслуговування клієнтів, зменшити логістичні витрати та забезпечити більш швидку і ефективну обробку контейнерів на всіх етапах перевезень. Результати дослідження також забезпечили підвищення конкурентоспроможності компанії на ринку інтермодальних перевезень завдяки впровадженню сучасних методів оптимізації та підходів до управління контейнерними перевезеннями.

Заступник генерального директора

З розвитку виробництва

ТОВ «БРУКЛІН-КИЇВ»



Андрій КИМАН

ЗАТВЕРДЖУЮ

Проректор з науково-педагогічної роботи
Українського державного
університету залізничного транспорту



Артур КАГРАМАНЯН

серпень 2024 р.

АКТ ВПРОВАДЖЕННЯ

результатів дисертаційного дослідження
Пархоменко Лариси Олексіївни на тему «Розвиток теорії управління
експлуатаційною роботою залізничної системи в умовах
невизначеностей і ризиків»
у навчальному процесі кафедри управління експлуатаційною роботою
Українського державного університету залізничного транспорту

Цим Актом підтверджується, що в період з 2021 р. по теперішній час у навчальному процесі кафедри управління експлуатаційною роботою Українського державного університету залізничного транспорту при підготовці здобувачів вищої освіти (бакалаврів і магістрів) за спеціальністю 275 – Транспортні технології (на залізничному транспорті), при викладанні навчальних дисциплін «Основи теорії транспортних процесів і систем» і «Сучасні інформаційні технології», а також під час виконання кваліфікаційної роботи магістрів використовуються наступні результати дисертаційної роботи Пархоменко Л.О.:

аналіз отриманих результатів розрахунків, пов'язаних з визначенням пропускнуєї спроможності залізничної дільниці;

аналіз динаміки пасажиропотоків у швидкісному залізничному сполученні;

розроблену оптимізаційну математичну модель управління станцією;

розроблену оптимізаційну математичну модель планування роботи швидкісних пасажирських поїздів на напрямку;

розроблений принцип кодування рішення з метою забезпечення можливості застосування математичного апарату ГА;

запропоновану в роботі ідею поєднання технологій MetroCargo та CargoSprinter з метою посилення інтеграції морського і залізничного транспорту, розроблену оптимізаційну математичну модель оперативного планування контейнерних перевезень;

розроблену математичну модель управління прикордонною передавальною станцією на засадах ризик-менеджменту з метою здійснення своєчасного транскордонного трансферу вантажопотоків;

проведений статистичний аналіз даних, з яких було запропоноване удосконалення моделі розрахунку ПФП у вигляді функції залежності середньої тривалості переробки вагона від рівня завантаженості станції.

Декан факультету управління
процесами перевезень

к. т. н., доцент

Максим Куценко

Додаток Б

Список публікацій здобувача

Наукові праці, у яких опубліковані основні наукові результати дисертації:

1. Panchenko S. V., Butko T. V., Prokhorchenko A. V., Parkhomenko L. O. Formation of an automated traffic capacity calculation system of rail networks for freight flows of mining and smelting enterprises. *Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu*. 2016. 2. P. 93–99 (видання індексовано в базі Scopus, Q3).
2. Пархоменко Л. О., Лавренюк В. О. Розроблення нечіткої моделі прогнозування кореспонденцій пасажирів у швидкісному русі на основі принципів просторової взаємодії. *Збірник наукових праць Українського державного університету залізничного транспорту*. 2016. 164. С. 15–22.
3. Панченко С. В., Бутько Т. В., Прохоров В. М., Пархоменко Л. О. Удосконалення технології організації вагонопотоків шляхом формування автоматизованої системи розрахунку і забезпечення виконання плану формування поїздів. *Вісник Східноукраїнського національного університету імені Володимира Даля*. 2017. 3. С.136–142.
4. Пархоменко Л. О., Серпокрилов В. Ю., Коваленко Д. М. Аналіз динаміки пасажиропотоків по Україні в умовах швидкісних перевезень. *Збірник наукових праць Українського державного університету залізничного транспорту*. 2017. (173). С. 143–148.
5. Пархоменко Є. О., Пархоменко Л. О. Формування інформаційно-керуючої системи стратегічного планування швидкісних пасажирських перевезень на залізничному транспорті. *Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті*. 2018. 5. С. 3–9.
6. Prokhorchenko A., Panchenko A., Parkhomenko L., Nesterenko H., Muzykin M., Prokhorchenko H., Kolisnyk A. Forecasting the estimated time of arrival for a cargo dispatch delivered by a freight train along a railway section. *Eastern-European Journal of*

Enterprise Technologies. 2019. 3/3(99). P. 30–38 (видання індексовано в базі Scopus, Q3).

7. Butko T., Kostiennikov O., Parkhomenko L., Prokhorov V., Bogomazova G. Forming an automated technology to manage freight transportation along a direction. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2019. 1/13(97). P. 6-13. DOI: 10.15587/1729-4061.2019.156098 (видання індексовано в базі Scopus, Q3).

8. Butko T., Prokhorov V., Kolisnyk A., Parkhomenko L. Devising an automated technology to organize the railroad transportation of containers for intermodal deliveries based on the theory of point processes. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2020. 1/3(103). P. 6–12 (видання індексовано в базі Scopus, Q3).

9. Butko T. V., Prokhorov V. M., Parkhomenko L. O., Prokopov A. O. Improvement of technology of passenger intermodal transportation with involvement of railway transport in the conditions of tourism development. *Science and Transport Progress. Bulletin of Dnipropetrovsk National University of Railway Transport*. 2021. № 1 (91). P. 37–50. DOI: 10.15802/stp2021/228106.

10. Розробка процедури формування схеми маршрутів поїздів для автоматизованої системи управління швидкісними пасажирськими перевезеннями / Л. О. Пархоменко, В. М. Прохоров, Т. Ю. Калашнікова та ін. *Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті*. 2021. 3(26). С. 18–26.

11. Parkhomenko L., Butko T., Prokhorov V., Kalashnikova T., Golovko, T. Building a model for planning rapid delivery of containers by rail under the conditions of intermodal transportation based on robust optimization. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2022. 5/3(119). P. 6–16. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2022.265668> (видання індексовано в базі Scopus, Q3).

12. Бутько Т. В., Пархоменко Л. О., Топчій А. В. Формалізація технології функціонування сортувальної станції на основі ризик-менеджменту. *Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті*. 2022. 4. С. 28–32.

13. 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. 1. Р. 31–37. DOI: 10.18664/iksz.v28i1.276341.

14. Пархоменко Л. О., Прохоров В. М., Калашнікова Т. Ю., Шандер О. Е. Розроблення СППР для управління процесом формування контейнерних поїздів у рамках системи інтермодальних перевезень. *Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті*. 2023. № 3. С. 29–42. DOI: 10.18664/iksz.v28i3.290142.

15. Бутько Т. В., Пархоменко Л. О., Артемов Е. М., Лагно О. С. Методи організації вантажних залізничних перевезень на основі ризик-орієнтованих технологій. *Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті*. 2023. № 4. С. 38–45. DOI: 10.18664/iksz.v28i4.296468.

16. Пархоменко Л. О., Прохоров В. М., Калашнікова Т. Ю., Овсянніков Д. О. Формування моделі управління пріоритетністю обробки вагонів на технічних станціях в умовах невизначеності. *Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті*. 2024. № 1. С. 45–54.

17. Пархоменко Л. О., Прохоров В. М., Калашнікова Т. Ю., Кофанов О. В. Формування моделі ризику в задачі забезпечення дотримання строку доставки вантажів в умовах невизначеності із використанням теорії нечітких множин та теорії Демпстера-Шафера. *Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті*. 2024. № 2. С. 81–90.

18. Пархоменко Л. О., Прохоров В. М. Уточнення моделі розрахунку плану формування поїздів за рахунок урахування ефекту навантаженості сортувальних станцій. *Вісник Приазовського Державного Технічного Університету. Серія: Технічні науки*. 2024. № 48. С. 193–205.

19. Пархоменко Л. О., Прохоров В. М., Калашнікова Т. Ю. Удосконалення технології управління місцевою роботою дільниці в умовах невизначеності на основі робастної оптимізації. *Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті*. 2024. № 3. С. 3–12.

Наукові праці, які додатково відображують наукові результати дисертації:

20. Панченко С. В., Бутько Т. В., Пархоменко Л. О., Прохорченко Г. О. Формування автоматизованої системи розрахунку графіка руху поїздів на сітьовому

рівні. *Інновації інфраструктури транспортно-логістичних систем. Проблеми, досвід, перспективи : збірник тез конференції (11-17 квітня 2016 р., м. Трускавець). Сєверодонецьк, 2016. С. 137–138.*

21. Пархоменко Л. О., Грицай В. О. Удосконалення технології роботи станції в частині покращення організації обслуговування пасажирів. *Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті*. 2018. № 4 (додаток). С. 80.

22. Prokhorchenko A., Parkhomenko L., Kyman A., Matsiuk V., Stepanova J. Improvement of the technology of accelerated passage of low-capacity car traffic on the basis of scheduling of grouped trains of operational purpose. *Procedia Computer Science*. 2019. Vol. 149. P. 86–94 (*індексовано в базі Scopus*).

23. Parkhomenko L., Viznyak R., Skurikhin D., Eiduks J. Railway-Ferry Crossings of Ukraine and Baltics as an Efficient Link of the Baltic-Black Sea Transport Corridor. *Lecture Notes in Intelligent Transportation and Infrastructure. ICTE in Transportation and Logistics 2019, Springer, 2020*. 171–179. https://doi.org/10.1007/978-3-030-39688-6_23 (*індексовано в базі Scopus*).

24. Lavrukhin L., Kravets A., Parkhomenko L., Kulova D., Panchenko A., Ivaskovska N. Improving the quality of railway operation to extend the services of transportation of cargo of small volume. *Lecture Notes in Intelligent Transportation and Infrastructure. ICTE in Transportation and Logistics 2019, Springer, 2020*. 35–43. [https:// DOI 10.1007/978-3-030-39688-6_6](https://doi.org/10.1007/978-3-030-39688-6_6) (*індексовано в базі Scopus*).

25. Пархоменко Л. О., Чехунов Д. М. Дослідження показників вантажних перевезень в контексті обробки вагонопотоків із небезпечними вантажами. *Матеріали Міжнародної науково-практичної Internet-конференції «Моделювання та інформаційні технології в науці, техніці та освіті» (21–22 листопада 2018 р.)*. Харків, 2018. С. 171–177. DOI 10.1016/j.procs.2019.01.111.

26. Parkhomenko L., Khodakivskyi O., Khodakivska Y., Kuzmenko O., Pakalnis A. Improvement of the organization of operation of the Ukrainian railway transport on the basis of the idea of unification of the automated freight and passenger transportation control system. *«Transport Means» – Proceedings of the International Conference*

(October 2019). *Kaunas University of Technology*. 2019. P. 859–861 (індексовано в базі Scopus).

27. Бутько Т. В., Колісник А. В., Пархоменко Л. О. Удосконалення організації взаємодії залізничних вузлів та портів при контейнерних перевезеннях. *Тези доповідей 1-ї Міжнародної науково-технічної конференції «Інтелектуальні транспортні технології» (Трускавець-Харків, 24-30 січня 2020 р.)*. Харків: УкрДУЗТ, 2020. С. 13.

28. Пархоменко Л. О., Калашнікова Т. Ю., Прохоров В. М. Підвищення інтеперабельності залізничної транспортної системи України при здійсненні інтермодальних контейнерних перевезень на основі технології Metrocargo™. *The 4th International scientific and practical conference «Innovations and prospects of world science» (December 1-3, 2021) Perfect Publishing, Vancouver, Canada*. 2021. С. 312–317.

29. Бутько Т. В., Прохоров В. М., Пархоменко Л. О., Прокопов А. О. Перспективи розвитку вантажних інтермодальних перевезень в Україні з точки зору побудови нових залізничних шляхів з Європейською шириною колії. *Тези доповідей 2-ї Міжнародної науково-технічної конференції «Інтелектуальні транспортні технології», ІТТ. 2021 (Харків, 27–29 квітня 2021 р.)*. Харків, 2021. С. 312–317.

30. Пархоменко Л. О., Мансурова З. Удосконалення технології роботи залізничного і морського транспорту на засадах логістики. *Тези доповідей 3-ї Міжнародної науково-технічної конференції «Інтелектуальні транспортні технології», ІТТ. 2022 (Харків, 22–23 листопада 2022 р.)*. Харків, 2022. С. 312–317.

31. Пархоменко Л. О., Коваль В. В. Удосконалення технологічної роботи приміського залізничного транспорту на основі взаємодії з міським транспортом. *Тези доповідей 3-ї Міжнародної науково-технічної конференції «Інтелектуальні транспортні технології», ІТТ. 2022 (Харків, 22–23 листопада 2022 р.)*. Харків, 2022. С. 56–57.

32. Пархоменко Л. О., Маслов М. К. Удосконалення роботи прикордонної сортувальної станції при перевезенні небезпечних. *Тези доповідей 3-ї Міжнародної*

науково-технічної конференції «Інтелектуальні транспортні технології», ІТТ. 2022 (Харків, 22–23 листопада 2022 р.). Харків, 2022. С. 57–58.

33. Пархоменко Л. О., Збукарь Д. В., Головка К. Ю., Рябков Б. Д. Удосконалення технології міжнародних залізничних перевезень на основі сучасних технічних засобів. *Тези доповідей 3-ї Міжнародної науково-технічної конференції «Інтелектуальні транспортні технології», ІТТ. 2022 (Харків, 22–23 листопада 2022 р.).* Харків, 2022. С. 54–56.

34. Твердохліб Ю., Шатунов Д., Пархоменко Л. Організація роботи сортувальної станції в умовах потенційних ризиків та перевезення небезпечних вантажів. *Тези доповідей 4-ї Міжнародної науково-технічної конференції «Інтелектуальні транспортні технології», ІТТ. 2023 (Харків, 27–28 листопада 2023 р.).* Харків, 2023. С. 64–65.

35. Кірік О., Глибокий Ю., Пархоменко Л. Організація пасажирського руху в міжнародному сполученні. *Тези доповідей 4-ї Міжнародної науково-технічної конференції «Інтелектуальні транспортні технології», ІТТ. 2023 (Харків, 27–28 листопада 2023 р.).* Харків, 2023. С. 44–45.

36. Кудзієв М., Овсянніков Д., Пархоменко Л. Удосконалення технології взаємодії залізничного транспорту з морським портом. *Тези доповідей 4-ї Міжнародної науково-технічної конференції «Інтелектуальні транспортні технології», ІТТ. 2023 (Харків, 27–28 листопада 2023 р.).* Харків, 2023. С. 63–64.

37. Dahal K., Prokhorchenko A., Koirala R., Ahmed Sh., Parkhomenko L., Kravchenko M., Kharchenko D. Improvement of railway transportation of grain cargoes in Ukraine based on the principles of shared logistics. *Proceedings of the 4th international scientific and technical conference «Intelligent transport technologies», ІТТ. 2023 (Kharkiv, November 27–28 2023).* Kharkiv, 2023. P. 77–79.

38. Бутько Т. В., Пархоменко Л. О. Формування методів і моделей управління експлуатаційною роботою залізничної транспортної системи в умовах ризиків. *Матеріали двадцятої Міжнародної науково-практичної конференції «Міжнародна транспортна інфраструктура, індустриальні центри та корпоративна логістика», NTI. 2024 (Харків, 6–7 червня 2024 р.).* Харків, 2024. С. 45–47.

39. Пархоменко Л. О., Прохоров В. М., Калашнікова Т. Ю. Нечітка логіка другого типу як інструмент управління експлуатаційною роботою в умовах невизначеностей і ризиків. *Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті*. 2024. № 3 (додаток). С. 39.

40. Спосіб перевезення вантажів залізничним вагоном та його розвантаження на роторному вагоноперекидачі: пат. № 119656 Україна, МПК (2017.01). B61F 1/06 (2006.01), B60S 11/00, B65G 67/34 (2006.01), B65G 63/00, B61D 47/00. а2013 04011; заявл. 01.04.2013; опубл. 10.10.2017, Бюл. № 19. 6 с.

41. Система регулювання руху транспортних засобів: пат. № 139834 Україна, МПК G00G 1/08 (2006.01). u2019 06658; заявл. 13.06.2019; опубл. 27.01.2020, Бюл. № 2. 2 с.

Відомості про апробацію результатів дисертації:

1. Міжнародна науково-практична конференція «Інновації інфраструктури транспортно-логістичних систем. Проблеми, досвід, перспективи» (Трускавець, 11–17 квітня 2016 р., Україна) (заочна участь).

2. 31-ша Міжнародна науково-практична конференція «Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті». 2018 (Харків, 24–26 жовтня 2018 р., Україна) (очна участь).

3. Міжнародна науково-практична Internet-конференція «Моделювання та інформаційні технології в науці, техніці та освіті» (Харків, 21–22 листопада 2018 р., Україна) (заочна участь).

4. International Conference «Transport Means» (Паланга, 2–4 жовтня 2019 р., Литва) (заочна участь).

5. 1-ша Міжнародна науково-технічна конференція «Інтелектуальні транспортні технології», 2020 (Трускавець–Харків, 24–30 січня 2020 р., Україна) (очна участь).

6. The 4th International scientific and practical conference «Innovations and prospects of world science» (Ванкувер, 1–3 грудня 2021 р., Канада) (заочна участь).

7. 2-га Міжнародна науково-технічна конференція «Інтелектуальні транспортні технології» (Харків, 27–29 квітня 2021 р., Україна) (очна участь).
8. 3-тя Міжнародна науково-технічна конференція «Інтелектуальні транспортні технології» (Харків, 22–23 листопада 2022 р., Україна) (очна участь).
9. 4-та Міжнародна науково-технічна конференція «Інтелектуальні транспортні технології» (Харків, 27–28 листопада 2023 р., Україна) (очна участь).
10. 20-та Міжнародна науково-практична конференція «Міжнародна транспортна інфраструктура, індустріальні центри та корпоративна логістика» (Харків, 6–7 червня 2024 р., Україна) (очна участь).
11. 37-ма Міжнародна науково-практична конференція «Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті» (Харків, 10-11 жовтня 2024 р., Україна) (очна участь).

Додаток В

Візуалізація показників і параметрів експлуатаційної роботи

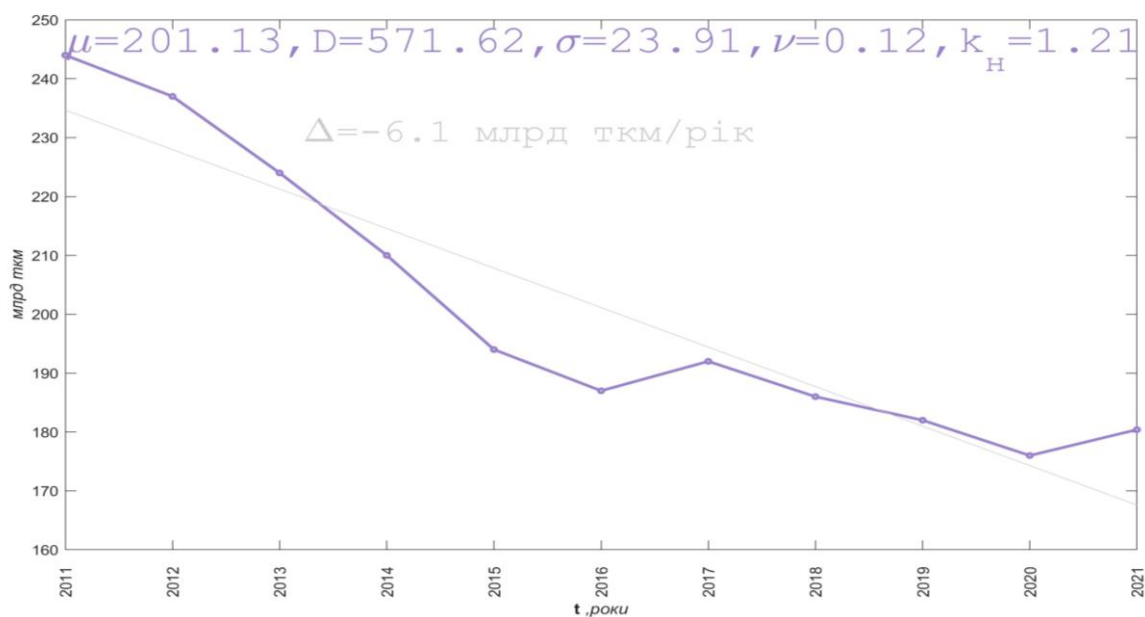


Рисунок В.1 – Річна динаміка вантажообігу залізничного транспорту

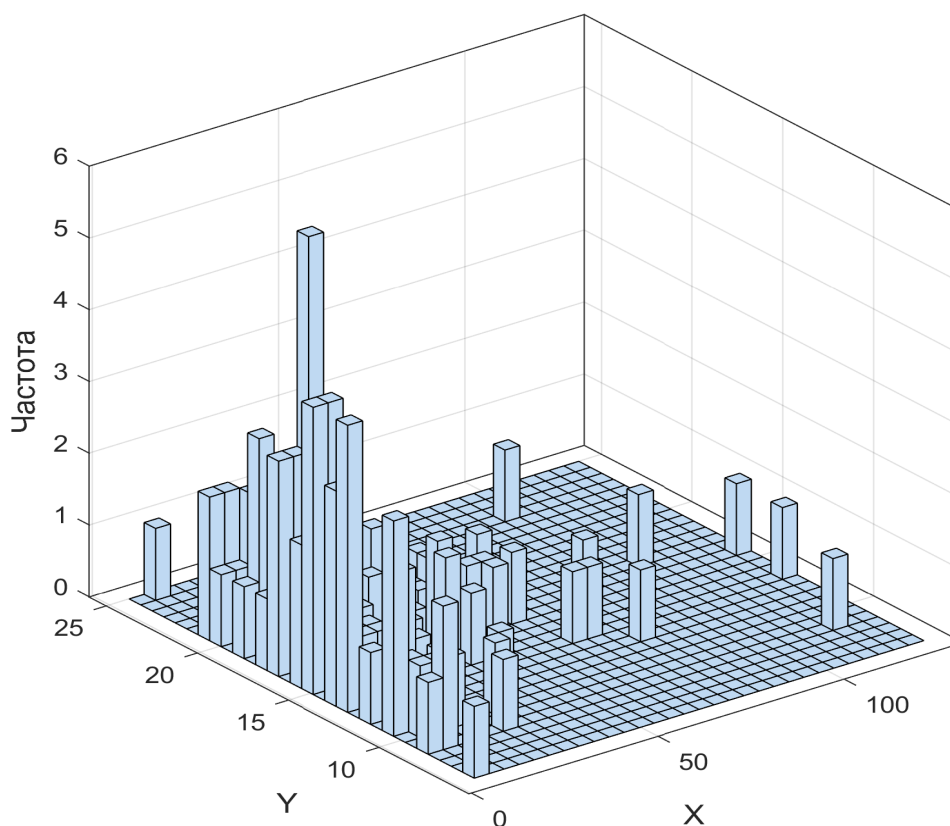


Рисунок В.2 – 3D-гістограма частотного розподілу двозмінного часового ряду

Додаток Г

Річна динаміка вантажообігу залізничного транспорту

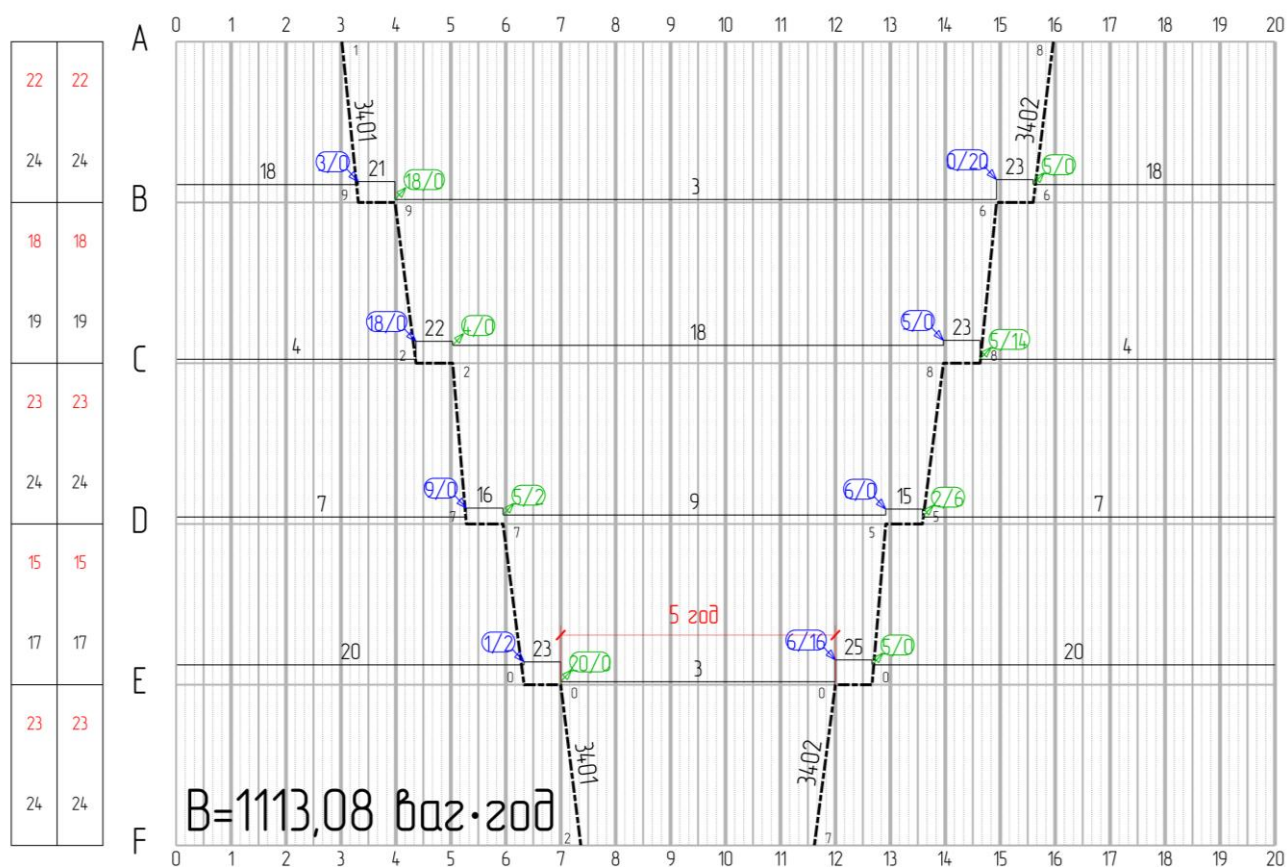


Рисунок Г.1 – План роботи збірних поїздів на ділянці А-Г за схемою «перший непарний поїзд»

Таблиця Г.1 – Варіант обсягів місцевої роботи

проміжні станції	В	С	Д	Е	Σ
навантаження в парному напрямку	1	1	1	1	4
навантаження в непарному напрямку	13	4	1	20	38
вивантаження в парному напрямку	6	6	6	1	19
вивантаження в непарному напрямку	6	18	9	1	34
разом навантаження	14	5	2	21	42
разом вивантаження	12	24	15	2	53
нестача порожніх вагонів	2	0	0	19	21
надлишок порожніх вагонів	0	19	13	0	32

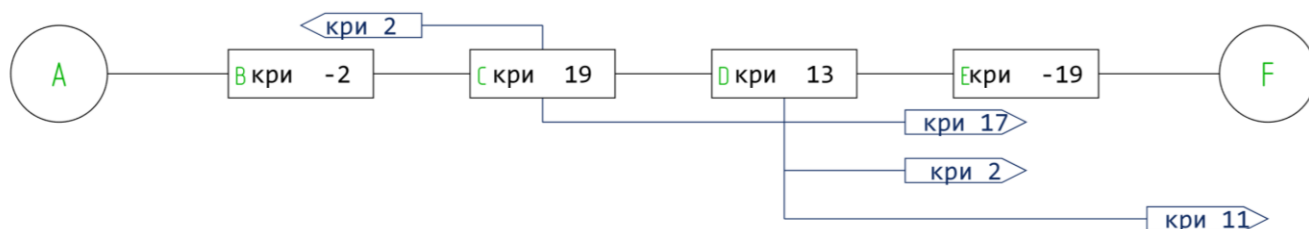


Рисунок Г.2 – Розподілу порожніх вагонів на дільниці А-Ф

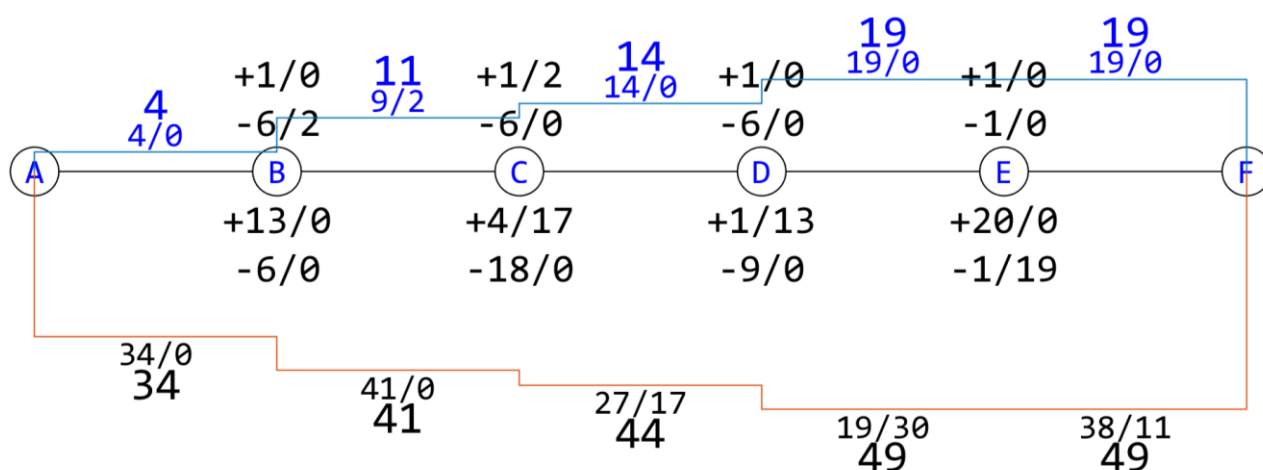


Рисунок Г.3 – Діаграма місцевих вагонопотоків на дільниці А-Ф

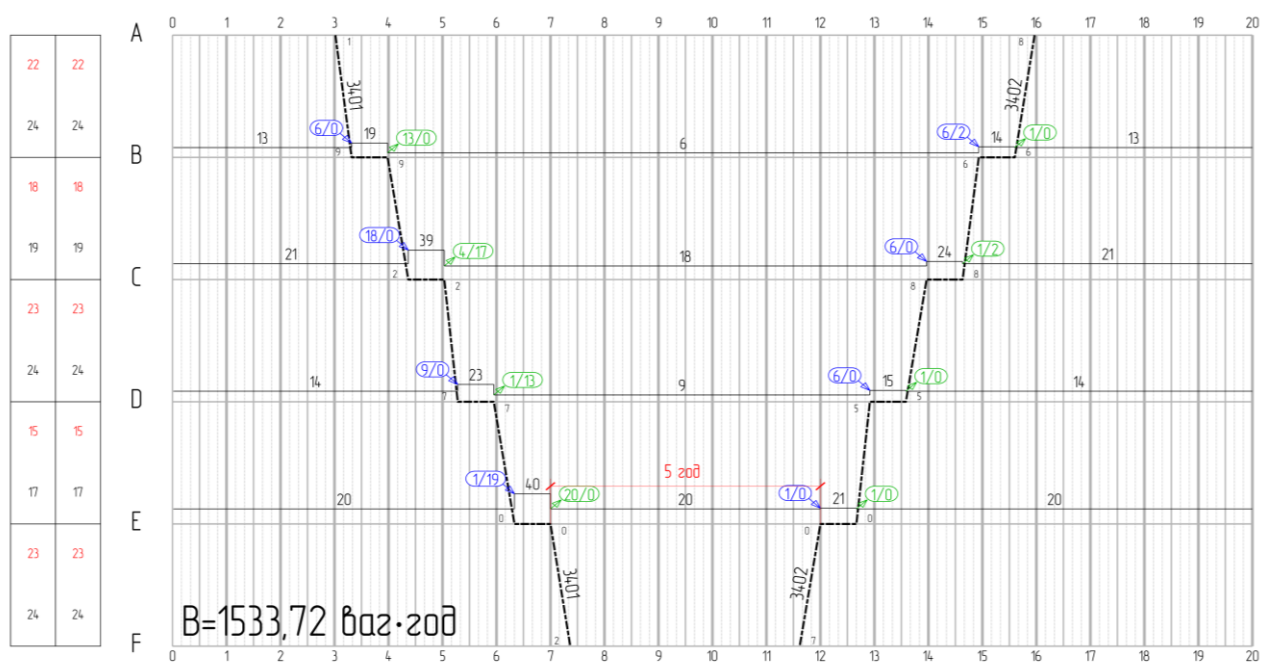


Рисунок Г.4 – План роботи збірних поїздів на дільниці А-В за схемою «перший непарний поїзд»

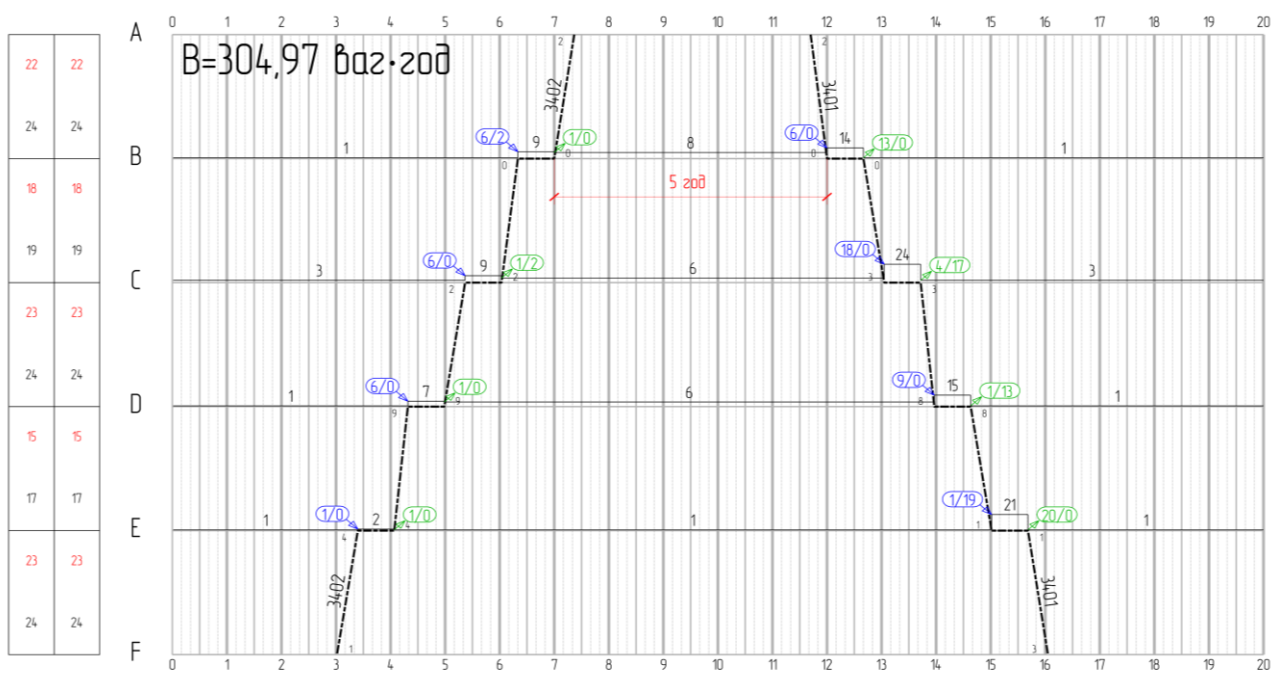


Рисунок Г.5 – План роботи збірних поїздів на дільниці А-В за схемою «перший парний поїзд»

Додаток Д

Результати моделювання процесу побудови оперативного плану роботи ТС

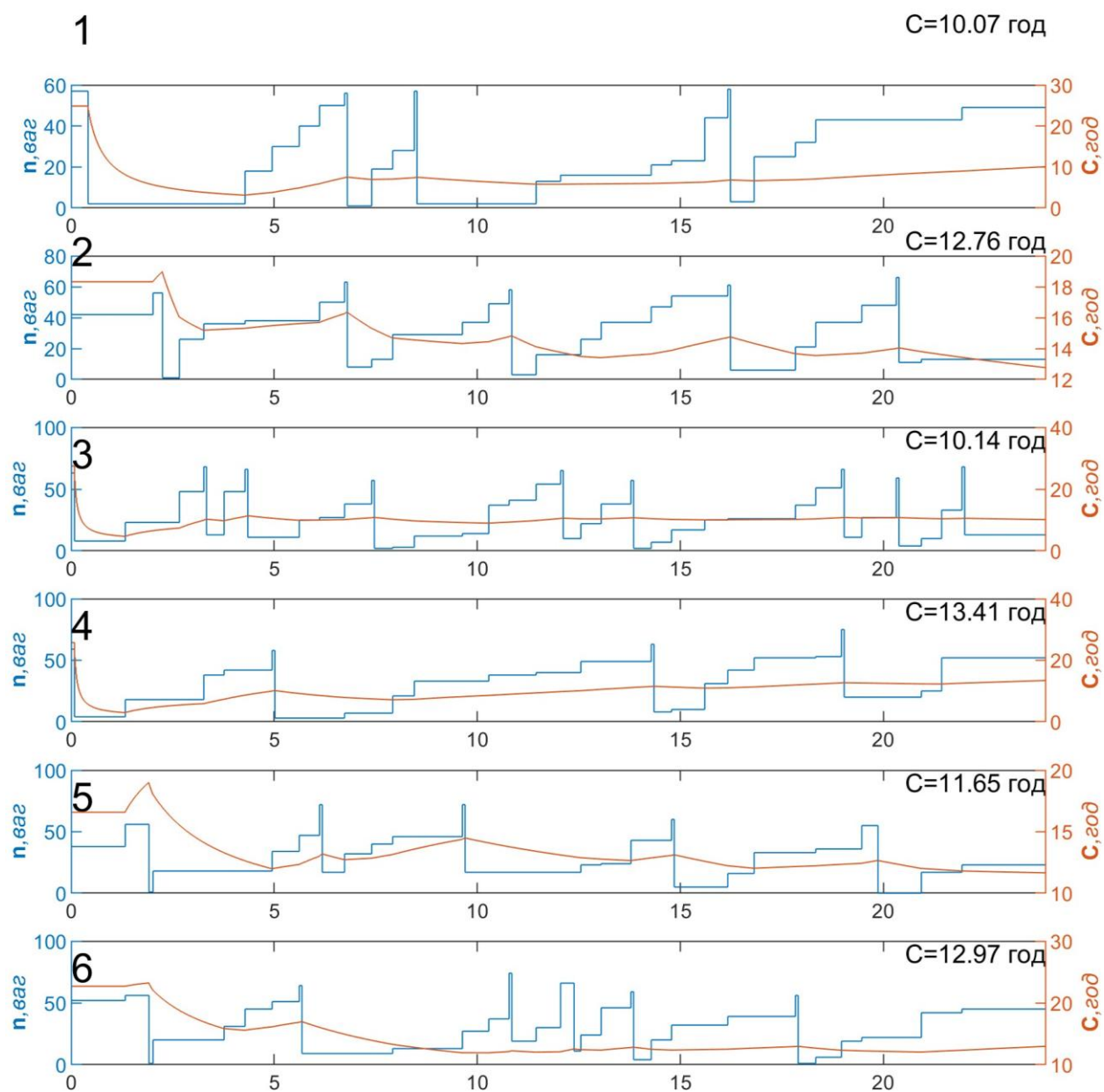


Рисунок Д.1 – Діаграма накопичення вагонів на коліях ТС, отримана в результаті моделювання на основі розробленої моделі

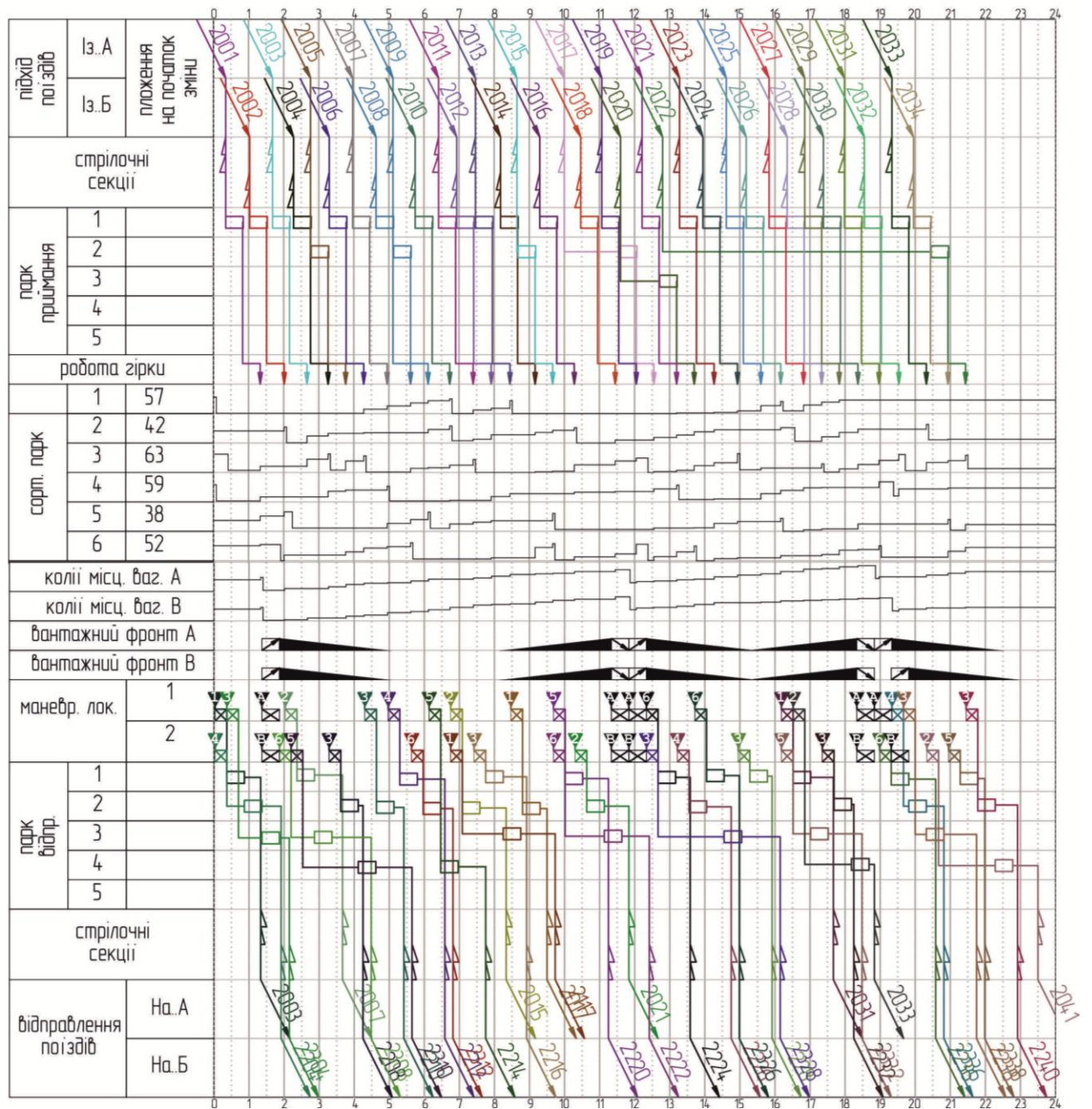


Рисунок Д.2 – Оперативний план-графік роботи ТС, отриманий у результаті моделювання на основі традиційної технології планування

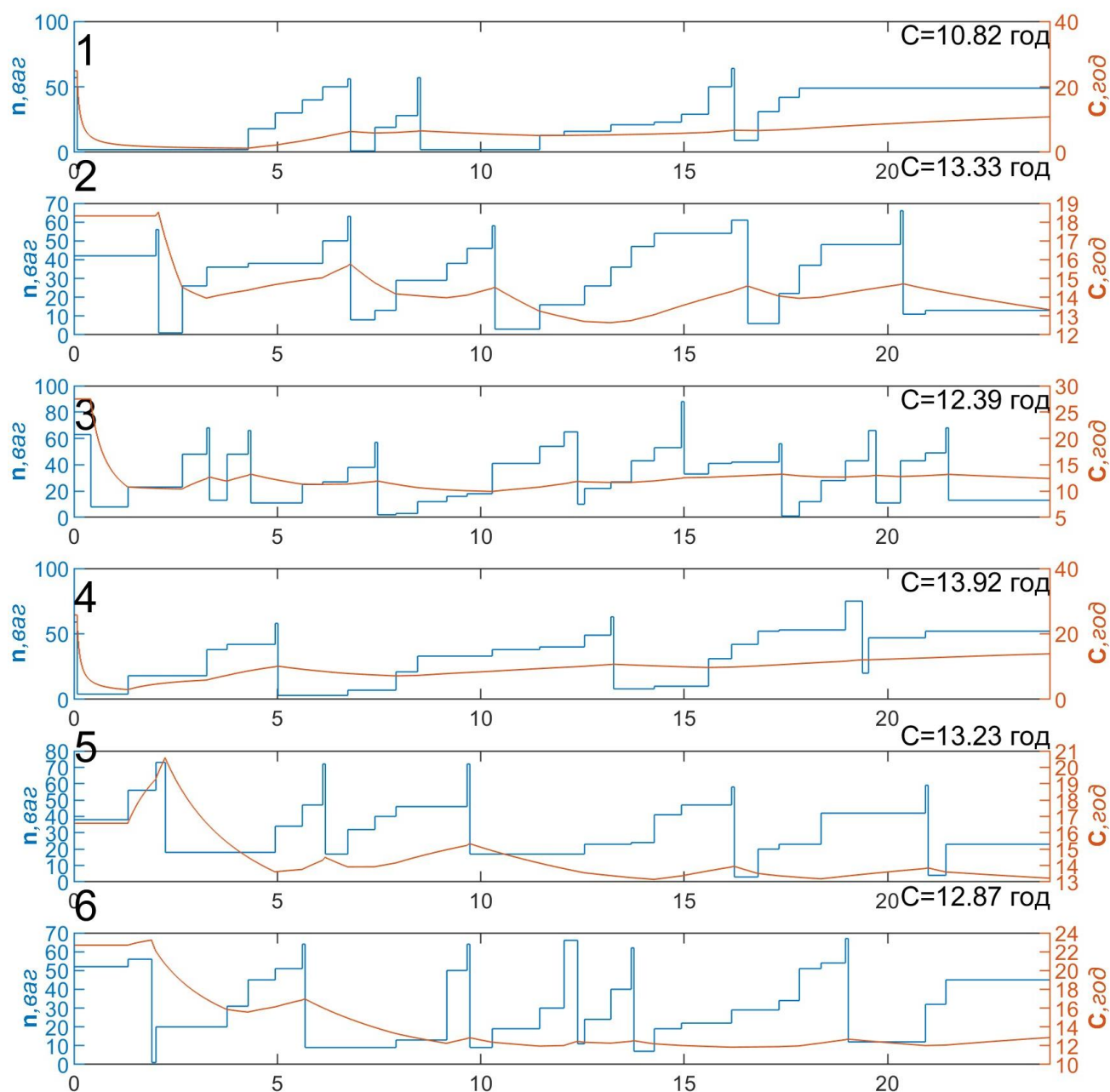


Рисунок Д.3 – Діаграма накопичення вагонів на коліях ТС, отримана в результаті моделювання на основі традиційної технології планування

Додаток Е

Дані динаміки добового вагонопотоку окремого напрямку сортувальної станції

Таблиця Е.1 – Дані динаміки добового вагонопотоку

№	дата	кількість вагонів	№	дата	кількість вагонів	№	дата	кількість вагонів
1	'03-Sep-2018'	60	37	'09-Oct-2018'	68	73	'14-Nov-2018'	70
2	'04-Sep-2018'	69	38	'10-Oct-2018'	66	74	'15-Nov-2018'	55
3	'05-Sep-2018'	64	39	'11-Oct-2018'	79	75	'16-Nov-2018'	66
4	'06-Sep-2018'	71	40	'12-Oct-2018'	61	76	'17-Nov-2018'	72
5	'07-Sep-2018'	68	41	'13-Oct-2018'	67	77	'18-Nov-2018'	65
6	'08-Sep-2018'	67	42	'14-Oct-2018'	63	78	'19-Nov-2018'	69
7	'09-Sep-2018'	78	43	'15-Oct-2018'	66	79	'20-Nov-2018'	63
8	'10-Sep-2018'	56	44	'16-Oct-2018'	69	80	'21-Nov-2018'	72
9	'11-Sep-2018'	70	45	'17-Oct-2018'	65	81	'22-Nov-2018'	70
10	'12-Sep-2018'	74	46	'18-Oct-2018'	58	82	'23-Nov-2018'	61
11	'13-Sep-2018'	65	47	'19-Oct-2018'	69	83	'24-Nov-2018'	65
12	'14-Sep-2018'	67	48	'20-Oct-2018'	66	84	'25-Nov-2018'	56
13	'15-Sep-2018'	59	49	'21-Oct-2018'	61	85	'26-Nov-2018'	66
14	'16-Sep-2018'	68	50	'22-Oct-2018'	66	86	'27-Nov-2018'	58
15	'17-Sep-2018'	68	51	'23-Oct-2018'	60	87	'28-Nov-2018'	61
16	'18-Sep-2018'	55	52	'24-Oct-2018'	68	88	'29-Nov-2018'	69
17	'19-Sep-2018'	68	53	'25-Oct-2018'	69	89	'30-Nov-2018'	66
18	'20-Sep-2018'	59	54	'26-Oct-2018'	73	90	'01-Dec-2018'	65
19	'21-Sep-2018'	64	55	'27-Oct-2018'	67	91	'02-Dec-2018'	72
20	'22-Sep-2018'	63	56	'28-Oct-2018'	55	92	'03-Dec-2018'	66
21	'23-Sep-2018'	73	57	'29-Oct-2018'	63	93	'04-Dec-2018'	66
22	'24-Sep-2018'	65	58	'30-Oct-2018'	68	94	'05-Dec-2018'	66
23	'25-Sep-2018'	59	59	'31-Oct-2018'	69	95	'06-Dec-2018'	71
24	'26-Sep-2018'	65	60	'01-Nov-2018'	62	96	'07-Dec-2018'	60
25	'27-Sep-2018'	65	61	'02-Nov-2018'	74	97	'08-Dec-2018'	61
26	'28-Sep-2018'	75	62	'03-Nov-2018'	62	98	'09-Dec-2018'	68
27	'29-Sep-2018'	63	63	'04-Nov-2018'	62	99	'10-Dec-2018'	65
28	'30-Sep-2018'	61	64	'05-Nov-2018'	69	100	'11-Dec-2018'	66
29	'01-Oct-2018'	66	65	'06-Nov-2018'	60	101	'12-Dec-2018'	63
30	'02-Oct-2018'	71	66	'07-Nov-2018'	65	102	'13-Dec-2018'	70
31	'03-Oct-2018'	64	67	'08-Nov-2018'	65	103	'14-Dec-2018'	68
32	'04-Oct-2018'	61	68	'09-Nov-2018'	68	104	'15-Dec-2018'	57
33	'05-Oct-2018'	66	69	'10-Nov-2018'	66	105	'16-Dec-2018'	60
34	'06-Oct-2018'	68	70	'11-Nov-2018'	57	106	'17-Dec-2018'	64
35	'07-Oct-2018'	60	71	'12-Nov-2018'	68	107	'18-Dec-2018'	70
36	'08-Oct-2018'	64	72	'13-Nov-2018'	59			

Таблиця Е.2 – Дані динаміки надгодження груп вагонів

№	час прибуття	кількість вагонів	№	час прибуття	кількість вагонів	№	час прибуття	кількість вагонів
1	wed-08:13	20	39	thu-01:33	16	77	thu-15:03	12
2	wed-08:23	11	40	thu-01:59	12	78	thu-15:15	11
3	wed-08:36	17	41	thu-02:32	13	79	thu-15:24	25
4	wed-09:22	17	42	thu-03:01	22	80	thu-16:26	16
5	wed-09:51	18	43	thu-03:17	12	81	thu-16:39	17
6	wed-09:57	14	44	thu-03:26	9	82	thu-17:26	18
7	wed-10:10	21	45	thu-03:43	19	83	thu-17:35	6
8	wed-10:36	18	46	thu-03:58	14	84	thu-19:40	13
9	wed-10:43	20	47	thu-04:10	21	85	thu-19:51	9
10	wed-10:59	17	48	thu-04:16	21	86	thu-20:02	14
11	wed-12:44	17	49	thu-04:42	14	87	thu-20:22	11
12	wed-12:59	17	50	thu-05:16	15	88	thu-20:39	17
13	wed-13:11	19	51	thu-05:24	11	89	thu-21:24	14
14	wed-13:18	17	52	thu-05:38	17	90	thu-22:21	15
15	wed-13:33	12	53	thu-06:28	16	91	thu-22:29	13
16	wed-13:39	21	54	thu-06:37	9	92	thu-22:48	18
17	wed-14:26	20	55	thu-06:49	15	93	fri-00:25	23
18	wed-14:41	18	56	thu-06:55	19	94	fri-00:57	10
19	wed-15:01	20	57	thu-07:11	17	95	fri-01:05	17
20	wed-16:56	9	58	thu-09:17	16	96	fri-01:41	16
21	wed-17:12	18	59	thu-09:23	13	97	fri-01:57	17
22	wed-17:21	15	60	thu-09:58	11	98	fri-02:05	17
23	wed-17:38	13	61	thu-10:04	15	99	fri-02:22	15
24	wed-17:44	11	62	thu-10:36	13	100	fri-02:27	13
25	wed-17:50	15	63	thu-11:17	20	101	fri-02:40	17
26	wed-19:08	12	64	thu-11:24	18	102	fri-02:53	13
27	wed-19:22	18	65	thu-11:50	19	103	fri-03:00	14
28	wed-19:37	10	66	thu-12:02	15	104	fri-03:19	10
29	wed-20:09	19	67	thu-12:14	19	105	fri-04:30	13
30	wed-20:18	15	68	thu-12:22	12	106	fri-04:43	10
31	wed-21:25	13	69	thu-12:28	15	107	fri-05:48	18
32	wed-21:39	20	70	thu-12:40	19	108	fri-06:18	22
33	wed-23:00	15	71	thu-12:47	13	109	fri-06:46	9
34	wed-23:23	17	72	thu-13:18	19	110	fri-07:06	13
35	wed-23:40	16	73	thu-13:24	16	111	fri-07:13	16
36	thu-00:03	13	74	thu-13:56	17	112	fri-07:24	15
37	thu-00:12	14	75	thu-14:06	20	113	fri-07:44	15
38	thu-00:39	12	76	thu-14:43	14			

Додаток Ж

Дані моментів часу надходження контейнерів до термінальної станції

Таблиця Ж.1 – Дані моментів часу надходження контейнерів

№	день тижня і час	години	№	день тижня і час	години
1	Monday 06:03:59	6.066	34	Monday 15:24:33	15.409
2	Monday 06:05:06	6.085	35	Monday 15:28:36	15.477
3	Monday 06:11:42	6.195	36	Monday 15:37:31	15.625
4	Monday 06:35:00	6.583	37	Monday 16:03:26	16.057
5	Monday 06:40:06	6.668	38	Monday 16:18:05	16.301
6	Monday 06:47:38	6.794	39	Monday 16:22:19	16.372
7	Monday 07:10:24	7.173	40	Monday 16:56:12	16.937
8	Monday 07:21:45	7.363	41	Monday 18:32:44	18.546
9	Monday 08:13:03	8.218	42	Monday 18:45:48	18.763
10	Monday 08:20:17	8.338	43	Monday 19:02:10	19.036
11	Monday 08:21:47	8.363	44	Monday 19:41:56	19.699
12	Monday 08:35:59	8.600	45	Monday 19:44:14	19.737
13	Monday 08:54:39	8.911	46	Monday 19:46:04	19.768
14	Monday 08:56:17	8.938	47	Monday 20:05:51	20.098
15	Monday 10:20:25	10.340	48	Monday 20:15:57	20.266
16	Monday 10:21:51	10.364	49	Monday 20:34:36	20.577
17	Monday 10:29:00	10.483	50	Monday 21:10:31	21.175
18	Monday 10:32:52	10.548	51	Monday 23:27:30	23.458
19	Monday 10:35:53	10.598	52	Tuesday 00:07:16	24.121
20	Monday 11:19:12	11.320	53	Tuesday 00:20:46	24.346
21	Monday 11:26:14	11.437	54	Tuesday 01:23:20	25.389
22	Monday 11:38:13	11.637	55	Tuesday 02:15:19	26.255
23	Monday 11:51:27	11.857	56	Tuesday 02:20:01	26.334
24	Monday 12:15:06	12.252	57	Tuesday 02:38:06	26.635
25	Monday 12:52:46	12.880	58	Tuesday 02:53:59	26.900
26	Monday 13:16:49	13.280	59	Tuesday 04:32:06	28.535
27	Monday 13:25:20	13.422	60	Tuesday 05:30:27	29.507
28	Monday 13:39:13	13.653	61	Tuesday 05:40:10	29.669
29	Monday 13:49:59	13.833	62	Tuesday 05:58:20	29.972
30	Monday 13:55:57	13.932	63	Tuesday 07:42:45	31.713
31	Monday 14:35:28	14.591	64	Tuesday 07:59:32	31.992
32	Monday 14:51:14	14.854	65	Tuesday 08:25:43	32.429
33	Monday 14:57:18	14.955	66	Tuesday 08:27:52	32.465