

Український державний університет залізничного транспорту

Кафедра управління вантажною і комерційною роботою

РОЗРОБКА МОДЕЛІ ПРОГНОЗУВАННЯ ОБСЯГІВ ВАНТАЖНИХ
ПЕРЕВЕЗЕНЬ ДЛЯ ОЦІНЮВАННЯ РІВНЯ ЗАВАНТАЖЕНОСТІ
ЗАЛІЗНИЧНОЇ ІНФРАСТРУКТУРИ

Пояснювальна записка і розрахунки
до кваліфікаційної роботи

РМПОВ.300.00.00.000 ПЗ

Розробив студент групи 221-ОПУТ-Д24
спеціальності 275 / 275.02 (роботу
виконано самостійно, відповідно до
принципів академічної доброчесності)



(підпис)

Віталій ФЕСЕНКО

Керівник: доцент, канд. техн. наук
Ганна БОГОМАЗОВА

Рецензент: доцент, канд. техн. наук
Максим КУЦЕНКО

АНОТАЦІЯ

Дана кваліфікаційна робота включає в себе 16 слайдів презентації, 88 аркушів пояснювальної записки формату А4, у тому числі 1 додаток на 2 аркушах, 15 рисунків, 5 таблиці, 43 літературних джерел.

Ключові слова: ПРОГНОЗУВАННЯ ОБСЯГІВ ПЕРЕВЕЗЕННЯ ВАНТАЖІВ, ЗАВАНТАЖЕНІСТЬ ЗАЛІЗНИЧНОЇ ІНФРАСТРУКТУРИ, НЕЙРОННА МЕРЕЖА, УПРАВЛІННЯ ВАГОНОПОТОКАМИ.

Об'єктом дослідження є процес прогнозування обсягів вантажоперевезень.

Предметом дослідження є процедура визначення прогнозних значень перевезення вантажів для підвищення ефективності використання залізничної інфраструктури.

Метою роботи є підвищення ефективності управління залізничною інфраструктурою шляхом розробки моделі прогнозування обсягів вантажних перевезень, що дозволяє завчасно оцінювати рівень завантаженості залізничних об'єктів.

У роботі удосконалено підхід до оцінювання рівня завантаженості залізничної інфраструктури шляхом використання нейромережевої моделі прогнозування обсягів вантажних перевезень, що дає можливість завчасно виявляти потенційну завантаженість окремих елементів інфраструктури та підвищувати ефективність планування їх роботи. На основі отриманих даних про обсяги перевезень і використовуючи модель технології управління вагонопотоками було вирішено задачу оптимального плану розподілу вагонів на розрахунковому залізничному полігоні. Процедура розподілу вагонів є достатньо універсальна та дозволяє в реальному масштабі часу корегувати план формування поїздів.

ABSTRACT

This qualification work includes 16 presentation slides, 88 pages of an explanatory note in A4 format, including 1 appendix on 2 sheets, featuring 15 figures, 5 tables, and 43 literature references.

Keywords: FORECASTING VOLUMES OF CARGO TRANSPORTATION, LOADING OF RAILWAY INFRASTRUCTURE, NEURAL NETWORK, RAIL FREIGHT FLOW MANAGEMENT

The object of the research is the process of forecasting the volume of cargo transportation.

The subject of the study is the procedure for determining the forecast values of cargo transportation to increase the efficiency of the use of railway infrastructure.

The aim of this study is to improve the efficiency of railway infrastructure management by developing a model for forecasting freight transport volumes, which enables the utilisation levels of railway facilities to be assessed in advance.

This paper refines the approach to assessing the utilisation level of railway infrastructure by employing a neural network model for forecasting freight transport volumes, which makes it possible to identify potential congestion in individual

infrastructure elements in advance and improve the efficiency of their operational planning. Based on the data obtained on freight volumes and using a model of wagon flow management technology, the problem of optimally allocating wagons at a model railway test site was solved. The wagon allocation procedure is sufficiently versatile and allows the train formation plan to be adjusted in real time.

Український державний університет залізничного транспорту

Факультет управління процесами перевезень

Кафедра управління вантажною і комерційною роботою

Освітній рівень: магістр

Спеціальність 275 Транспортні технології

275.02 Транспортні технології (на залізничному транспорті)

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри

доцент, канд. техн. наук

Антон КОВАЛЬОВ

« 23 » лютого 2026 р.

ЗАВДАННЯ НА ВИПУСКНУ КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ

Фесенку Віталію Анатолійовичу

1 Тема «Розробка моделі прогнозування обсягів вантажних перевезень для оцінювання рівня завантаженості залізничної інфраструктури»
керівник Богомазова Ганна Євгенівна, канд. техн. наук, доцент
затверджені розпорядженням по факультету Управління процесами перевезень від
23 лютого 2026 р. № 06/26

2 Строк подання студентом роботи 19 червня 2026 року

3 Вихідні дані. Технологія перевезення вантажів залізничним транспортом. Статистичні показники роботи залізничного транспорту. Організація перевезення вантажів. Технологія переміщення вагонопотоків.

4 Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити). Аналіз вантажопотоків України. Аналіз планових та фактичних обсягів перевезення вантажів залізничним транспортом. Дослідження методів прогнозування. Виявлення структури часового ряду обсягів перевезення вантажів. Формування математичної моделі прогнозування обсягів перевезення вантажів залізничним транспортом. Визначення завантаженості залізничної інфраструктури на основі прогнозних даних. Техніко-економічне обґрунтування впровадження додаткового програмного забезпечення щодо прогнозування даних, що інтегрується до Єдиної автоматизованої системи керування вантажними перевезеннями Укрзалізниці.

5 Перелік графічного матеріалу. Мета і задачі дослідження. Об'єкт, предмет дослідження, наукова новизна. Планові та фактичні обсяги перевезення зерна. Порівняння прогнозних моделей вантажних перевезень. Структура штучного нейрона. Нейронна мережа для прогнозування обсягів перевезення вантажів. Результат прогнозування. Перевірка на адекватність запропонованої нейронної мережі для прогнозування обсягів перевезення вантажів. Математична модель

технології управління вагонопотоками. Графічна інтерпретація впорядкованої множини варіантів переміщення вагонів на напрямку для визначення завантаженості залізничної інфраструктури. Економічний ефект від впровадження нейронної моделі прогнозування обсягів перевезення вантажів до АСК ВП УЗ – Є. Загальні висновки.

6 Консультанти окремих розділів

Розділ	Прізвище, ініціали, посада та науковий ступінь консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
Техніко-економічне обґрунтування впровадження додаткового програмного забезпечення для прогнозування даних до АСК ВП УЗ-Є	Наталія ГРИЦЕНКО, доцент, канд. екон. наук		

7 Дата видачі завдання 23 лютого 2026 р.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

Назва етапів	Строк виконання етапів	Примітка
1 Аналіз існуючого стану вантажоперевезень України	06.04.2026	<i>виконано</i>
2 Методи прогнозування обсягів перевезень на залізничному транспорті	27.04.2026	<i>виконано</i>
3 Формування моделі прогнозування обсягів перевезення вантажів залізничним транспортом	11.05.2026	<i>виконано</i>
4 Техніко-економічне обґрунтування впровадження додаткового програмного забезпечення для прогнозування даних до АСК ВП УЗ-Є	01.06.2026	<i>виконано</i>
Оформлення роботи	19.06.2026	<i>виконано</i>

Студент  Віталій ФЕСЕНКО

Керівник  Ганна БОГОМАЗОВА

Зміст

Вступ	7
1 Аналіз існуючого стану вантажоперевезень України	10
1.1 Аналіз вантажопотоків України	10
1.2 Аналіз теоретичних досліджень в сфері удосконалення процесів перевезення вантажів	15
2 Методи прогнозування обсягів перевезень на залізничному транспорті	21
2.1 Теоретичні основи прогнозування в транспортній галузі	21
2.2 Оцінка якості прогнозних моделей	30
3 Формування моделі прогнозування обсягів перевезення вантажів залізничним транспортом	47
3.1 Виявлення структури часового ряду обсягів перевезення вантажів залізницею України	47
3.2 Розробка моделі прогнозування обсягів перевезення вантажів та перевірка результатів прогнозування на точність	50
3.3 Удосконалення процедури визначення завантаженості залізничної інфраструктури	59
4 Техніко-економічне обґрунтування впровадження додаткового програмного забезпечення щодо прогнозування даних до АСК ВП УЗ-Є	67
Висновки	80
Список використаних джерел	82
Додаток А. Розрахунок необхідного парку рухомого складу з урахуванням прогнозних обсягів перевезень вантажів	87

					РМПОВ.300.00.00.000 ПЗ			
Змн.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата	Розробка моделі прогнозування обсягів вантажних перевезень для оцінювання рівня завантаженості залізничної інфраструктури	Літ.	Арк.	Акрушів
Розроб.	Фесенко			19.06		i		
Перевір.	Богомазова			19.06			4	88
Н. контр.	Богомазова			19.06		УкрДУЗТ		6
Затв.	Ковальов			19.06				

Вступ

Актуальність теми. В умовах постійних змін обсягів виробництва, логістичних потоків, міжнародної торгівлі та впливу зовнішніх факторів особливої важливості набуває завдання прогнозування обсягів вантажних перевезень. Точне прогнозування дозволяє своєчасно оцінювати рівень завантаженості залізничної інфраструктури, оптимізувати використання наявних ресурсів, підвищувати ефективність управління перевізним процесом та забезпечувати надійність транспортного обслуговування.

Особливої актуальності дана проблема набуває в умовах необхідності модернізації транспортної системи України, зростання вимог до якості логістичних послуг та раціонального використання інфраструктурних потужностей. Недостатня точність оцінювання майбутніх вантажопотоків може призводити до перевантаження окремих ділянок мережі, неефективного розподілу ресурсів та збільшення експлуатаційних витрат.

Розробка моделі прогнозування обсягів вантажних перевезень на основі сучасних методів аналізу даних і математичного моделювання дає змогу підвищити обґрунтованість управлінських рішень щодо планування роботи залізничної інфраструктури. Це сприятиме підвищенню пропускнуєї спроможності мережі, покращенню якості транспортного обслуговування та забезпеченню сталого розвитку залізничного транспорту.

Таким чином, тема розробки моделі прогнозування обсягів вантажних перевезень для оцінювання рівня завантаженості залізничної інфраструктури є актуальною як з наукової, так і з практичної точки зору.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Кваліфікаційна робота виконувалась відповідно до Національної транспортної стратегії України на період до 2030 року (Розпорядження Кабінету Міністрів України від 30 травня 2018 р. № 430-р), Угоди про асоціацію між Україною, з однієї сторони, та Європейським Союзом, Європейським співтовариством з

атомної енергії і їхніми державами-членами, з іншої сторони (Угоду ратифіковано із заявою Законом від 16.09.2014 р. № 1678-VII), Програми розвитку залізничних станцій та переходів, що межують з країнами ЄС та Молдовою на 2022–2025 рр., Політики управління ризиками та можливостями акціонерного товариства «Українська залізниця» (схвалено АТ «Укрзалізниця» № Ц-82/17 Ком.т. від 18.03.2024).

Мета і задачі дослідження. Метою роботи є підвищення ефективності управління залізничною інфраструктурою шляхом розробки моделі прогнозування обсягів вантажних перевезень, що дозволяє завчасно оцінювати рівень завантаженості залізничних об'єктів.

Реалізація цієї мети потребує постановки та вирішення таких задач дослідження:

- провести статистичний аналіз часового ряду обсягів перевезення вантажів залізницями України;
- розробити модель прогнозування обсягів перевезення вантажів та перевірити результати прогнозування на точність;
- запропонувати математичну модель, що вирішує оптимізаційну задачу організації вагонопотоків;
- визначити економічну доцільність від впровадження додаткового програмного забезпечення щодо прогнозування даних до АСК ВП УЗ-Є.

Об'єктом дослідження є процес прогнозування обсягів вантажоперевезень.

Предметом дослідження є процедура визначення прогнозних значень перевезення вантажів для підвищення ефективності використання залізничної інфраструктури.

Методи дослідження. Виконані дослідження базуються на використанні: методів математичної статистики для проведення аналізу основних експлуатаційних показників роботи залізничного транспорту; одномірному спектральному аналізі Фур'є для визначення сезонних і циклічних коливань; методах побудови штучних нейронних мереж для реалізації задачі

прогнозування обсягів перевезення вантажів та завантаженість залізничної інфраструктури на визначених напрямках; методах оптимізації для вирішення оптимального маршруту слідування вагонопотоків.

Наукова новизна. У роботі удосконалено підхід до оцінювання рівня завантаженості залізничної інфраструктури шляхом використання нейромережевої моделі прогнозування обсягів вантажних перевезень, що дає можливість завчасно виявляти потенційну завантаженість окремих елементів інфраструктури та підвищувати ефективність планування їх роботи.

Практичне значення одержаних результатів. Практичні результати роботи полягають у розробці процедури визначення завантаженості залізничної інфраструктури на основі прогнозних даних про обсяги перевезення вантажів.

Така процедура сприяє раціональному розподілу вантажних ресурсів за напрямками перевезення і зменшує простій поїздів на станціях і на перегонах в очікуванні звільнення залізничної інфраструктури. Для диспетчерського персоналу запропоновані методи надають можливість в автоматизованому режимі приймати обґрунтовані рішення щодо направлення або зміни маршруту прямування вагонопотоків.

Апробація результатів роботи. Основні положення роботи доповідались, обговорювались та схвалені на 6-й Міжнародній науково-технічній конференції «Інтелектуальні транспортні технології», що проводилась в Українському державному університеті залізничного транспорту 24 – 26 листопада 2025 р. (м. Харків). Оpubліковано тези доповіді, отримано сертифікат учасника. А також на 85 студентській науково-технічній конференції, що проводилась в Українському державному університеті залізничного транспорту 10-11 грудня 2025 р. (м. Харків). Оpubліковано тези доповіді.

1 Аналіз існуючого стану вантажоперевезень України

1.1 Аналіз вантажопотоків України

Сучасний стан вантажних перевезень в Україні характеризується значною залежністю від умов воєнного часу, структурною перебудовою вантажопотоків та загальним зниженням стабільності логістичної системи. Провідну роль у внутрішніх та міжнародних перевезеннях продовжує відігравати залізничний транспорт, який забезпечує найбільшу частку вантажообігу країни.

За підсумками 2024 року в Україні було перевезено близько 174,9 млн тонн вантажів залізничним транспортом, що на 17,9% більше, ніж у 2023 році. Це стало найкращим показником за період воєнного стану завдяки частковому відновленню експортних маршрутів та роботі морських коридорів. Водночас у 2025 році спостерігається спад: обсяг перевезень знизився до приблизно 161,3 млн тонн, що на 7,8% менше порівняно з 2024 роком [1]. У ширшому транспортному вимірі загальний обсяг вантажних перевезень України у 2025 році становив близько 322,2 млн тонн, що на 9% менше, ніж у попередньому році.

Залізничний транспорт залишається ключовим у вантажній логістиці країни, забезпечуючи понад третину всіх перевезень. За даними Держстату [2], його частка перевищує автомобільний транспорт за обсягами перевезених вантажів.

Також залізниця формує основу вантажообігу, особливо у міжрегіональних та експортних перевезеннях, де переважають масові вантажі.

Від сталої роботи залізничного транспорту безпосередньо залежить економіка України. Географічні особливості України визначають базову роль залізничного транспорту у перевезеннях вантажів, до яких відносяться: залізнична сировина, кам'яне вугілля, добрива, нафта й нафтопродукти, лісові вантажі, чорні метали, будівельні вантажі (пісок, щебінь, гравій), цемент, зерно

та інші. Основний перелік вантажів за обсягами перевезення залізничним транспортом України за 2025 рік [1] представлений на рисунку 2.1.

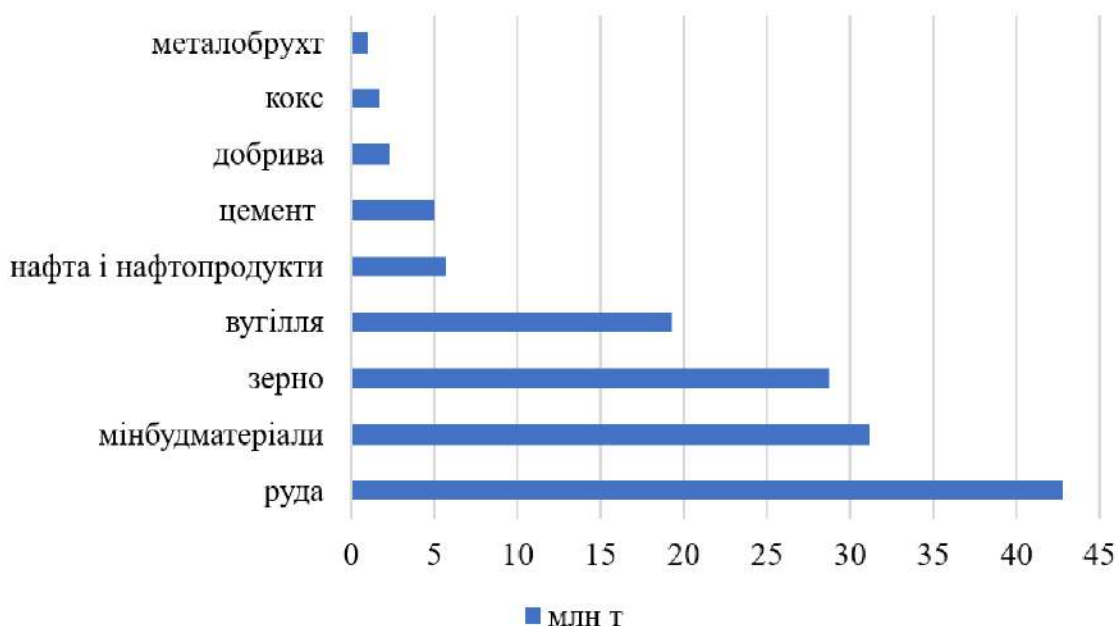


Рисунок 2.1 – Основний перелік вантажів за обсягами перевезення залізничним транспортом України за 2025 рік

За підсумками минулого року залізничним транспортом України було перевезено 161,3 млн т вантажів [2]. Це на 14 млн т або 8% менше, якщо порівнювати з 2024 роком. Фактично, мова йде про більш ніж подвійне падіння обсягів перевезень в порівнянні з показниками 2021 року. Ще більш відчутним є вплив негативної динаміки обсягів перевезень на фінансові показники "Укрзалізниці" – згідно власних розрахунків компанії, за 2025 рік прибуток від вантажних перевезень не перевищить 4-5 млрд грн, проти 20,4 млрд грн роком раніше.

Основними причинами падіння вантажної бази стало зменшення перевезень вугілля та зернових вантажів. У випадку з вугільними вантажопотоками головними чинниками стали системні удари країни-агресора по енергооб'єктам теплової генерації, наслідком яких стало зменшення

виробництва і накопичення вугілля на складах. Ситуація з перевезеннями зернових носила більш комплексний характер: зменшення обсягів перевезень було викликано рекордними обсягами перевезень зернових вантажів через зміщення експорту зерна врожаю 2023 року внаслідок відкриття морського коридору, зміщення збирання врожаю кукурудзи 2025 року майже на місяць (аграрії фізично не встигли вивезти обсяги кукурудзи на експорт восени 2025 року), а також логістичні ускладнення у листопаді-грудні 2025 року через удари по залізничній та портовій інфраструктурі.

В "зоні росту" вантажопотоків у 2025 році були нафта та нафтопродукти, цементні та будівельні матеріали. Але відносно невеликі обсяги перевезень вказаних видів вантажів не змогли істотно вплинути на загальну динаміку перевезень. Вантажі ГМК залишились на рівні 52,5 млн т практично без змін в порівнянні з 2024 роком: незначне зменшення перевезень руди було компенсоване зростанням обсягів транспортування чорних металів

Залізнична галузь в останні декілька років демонструє негативну динаміку розвитку. Обсяги перевезень стрімко падають [3]. Хоча тенденція останніх років до зниження вантажоперевезень залізницею спостерігається і надалі, однак наразі падіння стає не настільки різким як в 2014 – 2015 роках і складає лише 2 % (не беручи до уваги стан вантажоперевезень від початку повномасштабного вторгнення у 2022 році).

В Україні вантажі перевозяться залізничним, автомобільним, водним, трубопровідним та авіаційним видами транспорту. Обсяг перевезення вантажів кожного виду транспорту [3] наведений на рисунку 1.2, а вантажообіг – на рисунку 1.3.

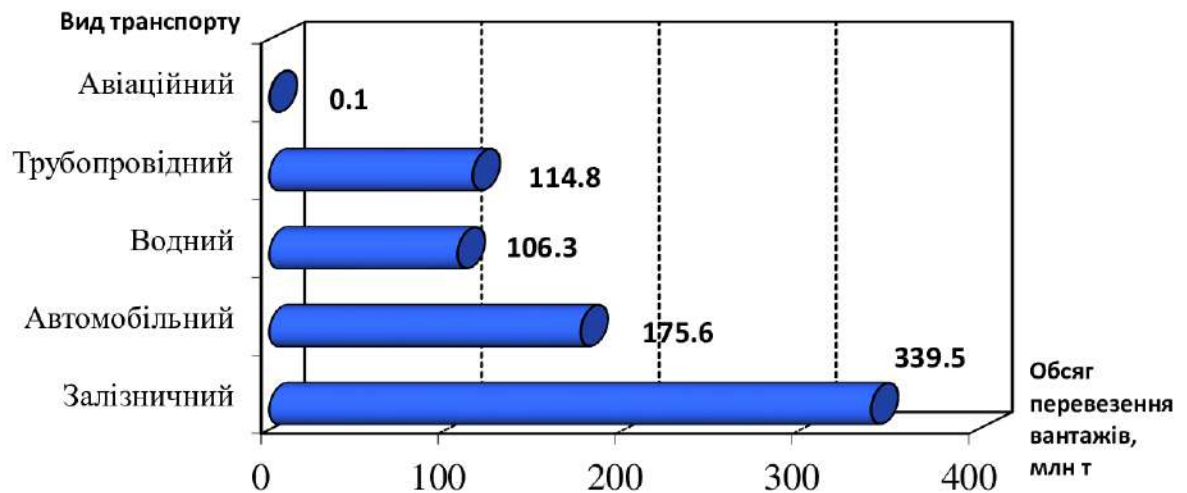


Рисунок 1.2 – Річні обсяги перевезення вантажів різними видами транспорту України

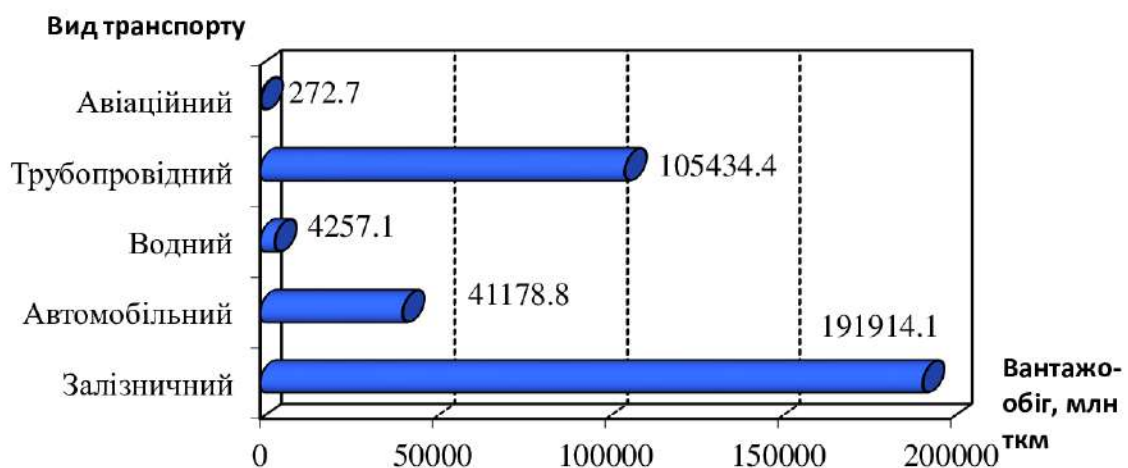


Рисунок 1.3 – Вантажообіг різних видів транспорту України

Як бачимо, незважаючи на негативну динаміку залізничних вантажних перевезень останніх років, залізничний транспорт, безперечно, займає лідируюче положення серед вантажних перевезень України.

В управлінні перевізним процесом прогнозування обсягів перевезення є першоосновою, так як будь-яке управлінське рішення має прогнозну або планову спрямованість. З цією метою і робиться прогнозування обсягів перевезення. Чим вище рівень прогнозування, тим ефективніше планування та управління перевізним процесом.

Для достовірності досліджень було проаналізовано планові та фактичні обсяги перевезення зернових вантажів (рисунок 1.4) та залізорудної сировини (рисунок 1.5).

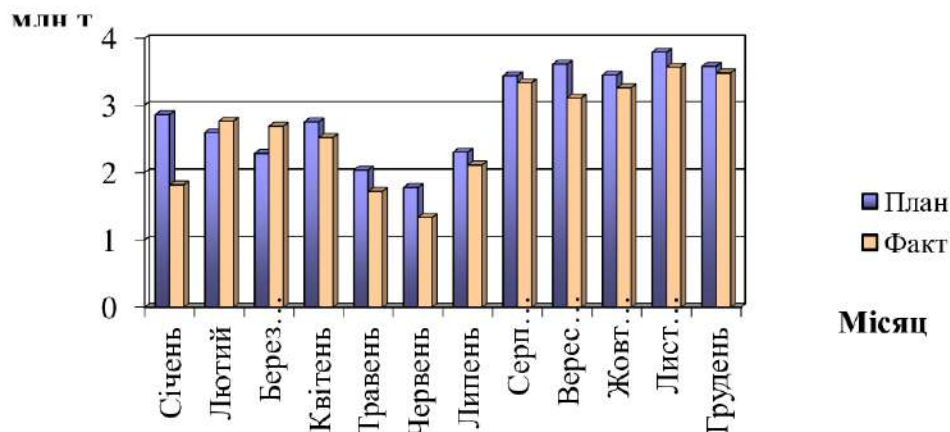


Рисунок 1.4 – Планові та фактичні обсяги перевезення зернових вантажів

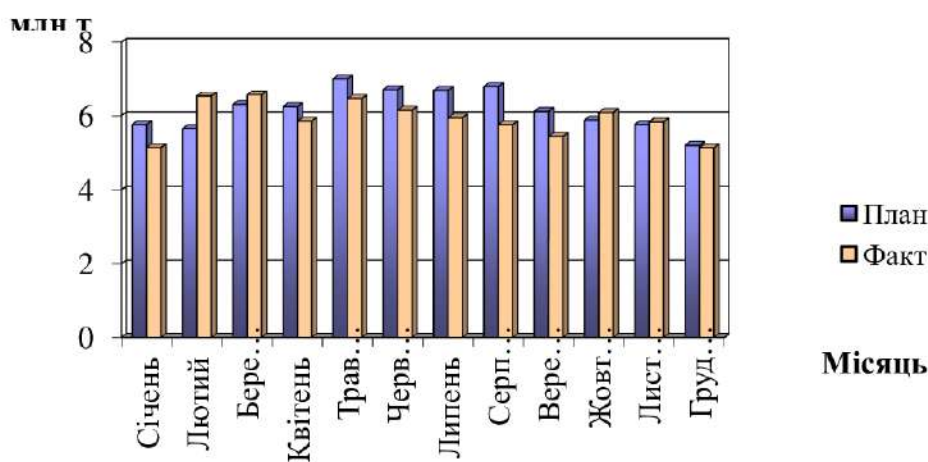


Рисунок 1.5– Планові та фактичні обсяги перевезення залізорудної сировини

Аналіз обсягів перевезення наймасовіших експортних вантажів показав, що існує значна розбіжність між теоретичними та практичними показниками. Це свідчить про необхідність більш достовірного підходу до прогнозування

обсягів перевезення, подальшого вдосконалення методології та методики розробки прогнозів.

1.2 Аналіз теоретичних досліджень в сфері удосконалення процесів перевезення вантажів

В умовах високої конкуренції між різними видами транспорту, залізниці повинні зберегти своє лідируюче місце у вантажних перевезеннях, особливо при перевезенні масових вантажів, на транспортному ринку країни. Тому перед Укрзалізницею постає завдання дослідити вподобання споживачів транспортної продукції, визначити пріоритети для подальшого розвитку галузі, надати надійну розгорнуту номенклатуру послуг для клієнтів залізниці.

На вибір транспорту вантажовласниками впливають як цінові, так і нецінові фактори: рівень тарифів на перевезення вантажів; швидкість та надійність доставки; якість перевезення; мінімальні грошові та часові витрати; мобільність рухомого складу; перелік послуг, що надаються; безпека функціонування і доступність ринку послуг; прозорість фінансової діяльності; конкурентоспроможність транспорту; доступність інфраструктури для користувачів; забезпеченість інформаційними ресурсами.

Стан виробничо-технічної бази залізниці й технологічний рівень перевезень за багатьма параметрами не відповідають потребам суспільства та європейським стандартам якості надання транспортних послуг, що найближчим часом може стати перешкодою для подальшого соціально-економічного розвитку держави.

Українські залізниці є провідними у дорожньо-транспортному комплексі України і забезпечують 82 % вантажних перевезень, що здійснюються всіма видами транспорту. За обсягами вантажних перевезень залізниці України займають четверте місце на Євразійському континенті, поступаючись лише

залізницям Китаю, Росії та Індії [4]. Але нині ці перевезення зазнають великих змін. Якщо раніше упродовж багатьох років ця галузь отримувала прибуток за рахунок збільшення попиту і завдяки державним інвестуванням у розвиток інфраструктури й послуг, то зараз перспектива представляється в іншому світлі. Прогнозується, що ринок вантажних залізничних перевезень буде позиціонуватися слабким економічним зростом, стагнацією попиту, обмеженістю державних джерел фінансування та фундаментальними технологічними проривами на конкуруючих видах транспорту.

На всі сфери бізнесу впливає безпосередньо глобальна напруженість в економіці, яка зберігається протягом останніх років. У тому числі і на стан ринку міжнародних вантажних перевезень. Незважаючи на висловлювання численних експертів про подолання піку кризи, обсяги перевезень скорочуються. Співвідношення видів міжнародних вантажоперевезень в регіонах й окремих країнах різне. В індустріальних країнах транспортна система представлена всіма видами транспорту. Особливо розвиненою є інфраструктура в Японії, США, Німеччини, Франції, Великобританії та деяких інших країн Європи. На їх частку припадає до 85 % світового вантажообігу. У західноєвропейських країнах за обсягами вантажоперевезень лідирує автомобільний транспорт (40 %), слідом йде залізничний (25 %). Решта припадає на морський та внутрішній водний.

Популярність залізничного транспорту пояснюється вигідними тарифами, низькою вартістю транспортування із розрахунку 1 тонна на 1 км і можливістю застосування мультимодальних схем. Загальна протяжність залізниць в світі – 1,2 млн км. Абсолютні лідери серед вантажів – вугілля й будівельні матеріали.

Проведені дослідження в сфері перевезення вантажів різними видами транспорту в країнах Європи, Азії та США показав, що залізничні перевезення вантажів більш затребувані, коли мова йде про перевезення на довгі дистанції при порівняно невисоких тарифах. Так, наприклад, залізничні перевезення на 30 – 40 % дешевше автомобільних. На сьогодні в Україні понад 70 % вантажів перевозяться за низькими тарифами. Хоча одним з основних джерел доходу

залізниці залишається вантажна та комерційна діяльність. На залізничному, як і на інших видах транспорту, ці роботи найбільш трудомісткі, важкі та мають велику вартість.

Директивою ЄС про розвиток залізничних доріг Співтовариства (91/440/ЄЕС) передбачено полегшення адаптації залізниць Співтовариств до вимог Єдиного Ринку й підвищення їх ефективності шляхом:

- забезпечення незалежності управління залізничними підприємствами;
- відокремлення управління залізницею та інфраструктурою від надання залізничних транспортних послуг з обов'язковим відокремленням їх рахунків та можливим організаційним чи інституційним відокремленням;
- вдосконалення фінансової структури підприємств;
- забезпечення доступу до мереж держав – членів міжнародним об'єднанням залізничних підприємств і залізничним підприємствам, які займаються міжнародним комбінованим перевезенням товарів.

Від системи організації вагонопотоків залежать продуктивність поїзних та маневрових локомотивів, інтенсивність використання сортувальних пристроїв і колійного розвитку станцій, виконання норм обігу вагонів та показників експлуатаційної роботи. Спосіб організації вагонопотоків повинен задовольняти вимогам зменшення кількості переробок вагонів та зниження собівартості перевезення.

Перш за все, під оптимальною організацією вагонопотоків розуміється направлення вагонів по економічно вигідним шляхам сполучення, що вирішується за рахунок техніко-економічних розрахунків по вибору напрямку просування вагонопотоків при наявності паралельних ліній та по найкоротшій відстані. Другим завданням є раціональний розподіл сортувальної роботи з вагонопотоками за оптимальним планом формування поїздів. Вагонопотоки, що слідують на далекі відстані за одним й тим самим маршрутом формують у наскрізні поїзди між технічними станціями, що виділені для мережевого розрахунку. Такий спосіб організації вагонопотоків у поїзди ще застосовувався

у радянські часи, але і на теперішній час система поїздоутворення особливо не змінилась.

Теоретичною і методологічною основами дослідження послужили наукові праці вчених в галузі планування і прогнозування різних сфер діяльності. В праці [5] зазначається необхідність прогнозування майбутніх обсягів перевезення залізничним транспортом при формуванні рівня тарифу на перевезення вантажу. В дослідженні [6] зазначається, що задача прогнозування майбутніх значень часового ряду є основою для фінансового планування в економіці. На основі історичних значень часових рядів робиться планування роботи підприємства, управління та оптимізація обсягів виробництва і складського контролю. Емпіричні результати [7] підтверджують, що штучна нейронна мережа є ефективним інструментом для прогнозування валютного курсу. Ця методика дає докази того, що існує можливість витягнути приховану інформацію для достовірного прогнозування майбутнього.

Прогнозування перевезення сировини та готової промисловості необхідне для підвищення точності оцінки пропускної спроможності залізничних мереж [8]. Тут застосовується імітаційне моделювання первинних і вторинних затримок поїздів в графіку руху на ділянці. Вибір варіантів прогнозу, застосовуючи нелінійну функцію тренду для визначення прогнозованого експлуатаційного вантажообігу на наступний період пропонується в [9]. Це дозволить заздалегідь планувати оптимальні маршрути доставки вантажів і сприятиме керівникам транспортних підприємств в поліпшенні системи управління перевізним процесом. Автори роботи [10] представляють простий підхід до прогнозування одновимірних часових рядів, який поєднує в собі поради з кількох узагальнених регресійних нейронних мереж. Запропонований алгоритм виглядає як більш потужний ніж існуючі.

Процес прийняття рішень при плануванні необхідної кількості рухомого складу вважається одним з найбільш проблемних питань для транспортної галузі. В роботі [11] розроблюється новий підхід до визначення розміру флоту при авіаперевезеннях за допомогою моделювання методом Монте-Карло.

Застосовуючи цей метод, авіакомпанія отримує максимальний прибуток. Така процедура рішення може бути застосована і на залізничному транспорті для виявлення необхідної кількості вагонів для перевезення вантажу, що прогнозується.

Для планування роботи вантажного транспорту в [12] пропонується алгоритм нечіткої регресії з точним передбаченням і пристосованості системи до реальної ситуації. А також розроблена нейронна мережа зі зворотним поширенням помилки для прогнозування вартості вантажних перевезень. Автори стверджують, що алгоритм нечіткої регресії є більш ефективним ніж нейронна мережа при великомасштабних плануванні та прогнозуванні. При цьому, в роботі [13] зазначається, що для досягнення точного довгострокового прогнозу краще застосовувати нейронну мережну модель. Така модель дає більш точні результати прогнозування ніж підходи, що засновані на теорії хаосу.

Прогнозування потоків є важливим компонентом транспортних систем. Прийняття необґрунтованих рішень при перевезенні вантажів веде до росту грошових витрат залізничної галузі. Управління перевезеннями повинно забезпечувати вибір і здійснення тільки оптимальних рішень, які можуть комплексно оцінювати показники транспортних засобів для різних варіантів перевезень [14]. У праці [15] зазначено, що генетичні алгоритми демонструють не лише високу точність розрахунків, але і забезпечують можливість урахування обмежень по пропускній і переробній спроможності об'єктів залізничної інфраструктури. Застосування даного методу дозволить вирішувати задачу розрахунку плану формування поїздів для всього полігону залізниць України на основі попередніх даних про обсяги перевезень вантажів.

Проведений експеримент [16] показав високу точність прогнозу при короткостроковому прогнозуванні пасажиропотоку. Результат прогнозування може бути застосований для планування вантажних операцій та управління доходами галузі. Для моделювання вантажних перевезень в статті [17] описується підхід з використанням штучних нейронних мереж та нейронечіткої

системи виведення. Такий підхід поєднує в собі здібності до навчання штучних нейронних мереж і прозорий характер нечіткої логіки. Модель виявляється вельми адаптивною й ефективною при дослідженні нелінійних взаємозв'язків між різними змінними. Використовуючи інформацію про вантажні потоки, цей підхід можливо застосувати і на українських залізницях.

Для достовірного прогнозування обсягів вантажних перевезень по залізницям України і можливості вилучення прихованої інформації при плануванні вагонопотоків в роботі було враховано вищенаведений існуючий досвід прогнозування як на транспорті, так і в інших галузях.

Висновок. Сучасний стан вантажоперевезень в Україні можна охарактеризувати як трансформаційний: система адаптується до кризових умов, але потребує модернізації інфраструктури, підвищення пропускної спроможності та оптимізації логістичних процесів для стабілізації та подальшого розвитку. Такі зміни пов'язані з трансформацією промисловості, логістичними обмеженнями та переорієнтацією експорту. Водночас залізничний транспорт залишається стратегічною основою вантажної логістики України та ключовим елементом забезпечення експорту.

2 Методи прогнозування обсягів перевезень на залізничному транспорті

2.1 Теоретичні основи прогнозування в транспортній галузі

У сучасних умовах розвитку економіки транспортна система відіграє визначальну роль у забезпеченні ефективного функціонування національного господарства. Залізничний транспорт, як один із базових елементів транспортної інфраструктури України, забезпечує значну частку вантажообігу та пасажирських перевезень, виступаючи стратегічно важливою галуззю економіки.

В умовах зростаючої конкуренції між видами транспорту, глобалізації економічних процесів та нестабільності зовнішнього середовища особливого значення набуває науково обґрунтоване прогнозування. Саме прогнозування дозволяє визначити майбутні тенденції розвитку, оцінити потенційні ризики та сформулювати ефективну стратегію розвитку транспортної системи.

Прогнозування обсягів перевезень є складним аналітичним процесом, що передбачає дослідження закономірностей зміни транспортних потоків, виявлення факторів впливу та оцінку можливих сценаріїв розвитку подій. Воно базується на використанні статистичних даних, економічного аналізу та сучасних інформаційних технологій.

Особливістю залізничного транспорту є його висока інерційність, що обумовлена значними капітальними вкладеннями в інфраструктуру та рухомий склад. Це означає, що рішення, прийняті сьогодні, матимуть довгострокові наслідки, а отже, потребують ретельного прогнозного обґрунтування.

Таким чином, прогнозування виступає важливим елементом системи управління залізничним транспортом, забезпечуючи обґрунтованість управлінських рішень і підвищення ефективності функціонування галузі.

Прогнозування обсягів перевезень полягає у визначенні можливих майбутніх значень показників транспортної діяльності на основі аналізу

історичних даних і факторів впливу. Воно є невід'ємною складовою процесу стратегічного та оперативного планування.

Економічна сутність прогнозування проявляється у його здатності забезпечити:

- узгодження попиту та пропозиції транспортних послуг;
- ефективне використання виробничих ресурсів;
- зниження витрат на експлуатацію;
- підвищення рівня обслуговування споживачів.

У системі управління залізничним транспортом прогнозування виконує такі функції:

- аналітична функція – забезпечує аналіз тенденцій розвитку транспортного ринку;
- планова функція – слугує основою для формування планів діяльності;
- регулююча функція – дозволяє коригувати управлінські рішення залежно від змін зовнішнього середовища;
- прогностична функція – визначає можливі сценарії розвитку подій.

Особливого значення прогнозування набуває в умовах нестабільності економіки, коли традиційні підходи до планування виявляються недостатньо ефективними. У таких умовах прогнозування стає інструментом адаптації до змін і зниження невизначеності.

Прогнози спливають кожен день в тому чи іншому вигляді в різних засобах масової інформації та дезінформації, при цьому багато з них вже на наступний день забуваються. Методи прогнозування різноманітні. Прогнозування (у широкому розумінні) – це наукове передбачення, яке застосовано на врахуванні різноманітних чинників, що дозволяють охарактеризувати розвиток об'єкта. Головне ж, що відокремлює прогнозування від інших дисциплін – це погляд у майбутнє.

Під прогнозом розуміється науково обґрунтоване судження про можливі стани об'єкта в майбутньому, про тенденції його розвитку. Процес розробки прогнозів називається прогнозуванням.

Прогнозування є сполучною ланкою між теорією і практикою ц всіх сферах громадського життя. Воно може розглядатися як передбачення та вказівки. Передбачення припускає опис можливих перспектив, станів, рішень проблем майбутнього на основі використання інтуїції, життєвого досвіду і спеціальних наукових досліджень. Вказівка являє собою визначення можливих шляхів досягнення поставленої мети, тобто використання інформації про майбутнє в цілеспрямованій діяльності для прийняття рішень. Вказівку можна розглядати як виявлення варіантів розпорядження.

Всі прогнози можна об'єднати у три групи: природознавчі, науково-технічні і суспільствознавчі (соціально-економічні).

Одним з найважливіших напрямків суспільствознавчого прогнозування є економічне прогнозування – науково-економічна дисципліна, об'єктом дослідження якої є процес суспільного виробництва, а предметом – визначення можливих станів економічних об'єктів у майбутньому, дослідження закономірностей їх розвитку, а також способів розробки економічних прогнозів.

Прогнозування економічного розвитку являє собою процес розробки економічних прогнозів, заснований на наукових методах пізнання економічних явищ і використанні всієї сукупності методів прогнозування. Економічний прогноз – це система вірогідних оцінок розвитку економіки в майбутньому.

Основними завданнями прогнозування є:

- з'ясування перспективи розвитку об'єкта в найближчому або більш віддаленому майбутньому, виходячи з дійсності;
- сприяння виробленню оптимальних поточних і перспективних планів (програм), спираючись не складений прогноз і оцінку можливих наслідків прийнятих рішень.

Прогнози розрізняються за: масштабом прогнозування, часом випередження, характером об'єкта прогнозування, функціональною ознакою.

За масштабом прогнозування прогнози поділяються на: макроекономічні, структурні (міжгалузеві, міжрегіональні, галузеві), регіональні, прогнози розвитку підприємств, об'єднань (мікроекономічні).

За часом (періодом) випередження прогнози підрозділяються на оперативні (час випередження до 1 місяця), короткострокові (від 1 місяця до року), середньострокові (від 1 до 5 років), довгострокові (від 5 до 15-20 років). Під періодом випередження розуміється відрізок часу від моменту, для якого є останні статистичні дані про досліджувальний об'єкт, до моменту, до якого відноситься прогноз. Угруповання економічних прогнозів у залежності від характеру досліджувальних об'єктів обумовлені дослідженням різних аспектів народногосподарської діяльності.

Під методами прогнозування розуміється сукупність прийомів і способів мислення, що дозволяють на основі дослідження й аналізу даних про минуле (ретроспективних) і теперішнє, а також зовнішніх та внутрішніх зв'язків об'єкта прогнозування вивести судження щодо вірогідного розвитку об'єкта у майбутньому [17].

Саме поглядом в майбутнє прогнозист і відрізняється від всіх інших аналітиків і дослідників. Прогнозист не може заспокоїтися, якщо модель просто добре описала дані, він повинен бути впевнений в тому, що модель дасть точний прогноз. Він вважає, що головний критерій корисності моделі – вміння передбачати. Статистичні властивості моделі для нього важливі, але не критичні. Пояснення причин подій, що відбулися – корисні, але не є самоціллю. Загалом, прогнозування – це дуже цікава, але при цьому і досить складна дисципліна.

Однак є один важливий елемент стосовно прогнозування, який не всі розуміють. Навіть деякі фахівці в цій області не віддають цьому звіт. Прогнозування потрібно не для того, щоб точно сказати, що саме нас чекає завтра. Найчастіше цього просто неможливо зробити. Ні, наприклад, ніякої реальної можливості сказати, який точно буде температура повітря завтра о 14.37. Що можна зробити, використовуючи методи прогнозування, – так це

знизити невизначеність. Якщо є прогноз погоди, то на основі нього можна вирішити, що одягати. Якщо у вас є прогноз продажів, то можете запастися необхідною кількістю валянок, для того, щоб заробити більше. Звичайно ж, прогноз не гарантує, що завтра о 14.37 буде сонячно, температура буде +24 градус за Цельсієм, але без прогнозу, прийняти правильне рішення про те, що надягати принаймні досить. Так що за великим рахунком головне завдання прогнозування – це зниження невизначеності.

Проблема розвитку системи прогнозування обсягів вантажних перевезень в сучасних умовах стала особливо актуальною. Аналіз і прогнозування обсягів перевезення вантажів є найважливішим інструментом вироблення ефективних управлінських рішень в частині формування тарифної стратегії. Також сприятиме вибору оптимальної стратегії розвитку галузі, визначенню необхідного технічного оснащення залізниць, плануванню потреби в матеріальних, трудових і фінансових ресурсах. Такі дії позитивно повинні вплинути на залучення клієнтів до залізничного транспорту.

Прогнозуванням обсягів перевезення на залізничному транспорті займаються ще недостатньо широко. Сучасні умови функціонування транспорту вимагають збільшити область прогнозування та вдосконалити методологію та методику розробки прогнозів.

Необхідність прогнозування обсягів перевезень обумовлена низкою факторів, що визначають специфіку функціонування залізничного транспорту.

По-перше, залізничний транспорт є капіталомісткою галуззю, що потребує значних інвестицій у розвиток інфраструктури. Будівництво нових колій, модернізація станцій, закупівля рухомого складу – всі ці процеси мають довгостроковий характер і потребують попереднього прогнозування.

По-друге, перевізний процес характеризується складною організаційною структурою, що включає взаємодію різних підрозділів. Для забезпечення ефективної роботи необхідно узгодити їх діяльність, що неможливо без прогнозних оцінок.

По-третє, попит на транспортні послуги є нестабільним і залежить від багатьох факторів, зокрема економічної ситуації, сезонності, міжнародної торгівлі та політичних умов.

Прогнозування дозволяє:

- визначити перспективні обсяги перевезень;
- забезпечити рівномірне завантаження інфраструктури;
- зменшити ризики перевантаження або недовантаження;
- підвищити ефективність використання ресурсів.

Отже, прогнозування є необхідною умовою ефективного функціонування залізничного транспорту.

Модель прогнозування повинна забезпечувати можливість гнучкої адаптації виробничих показників на коливання попиту. Це, в свою чергу, дозволить знизити економічні втрати залізничного транспорту і збільшити прибуток. Особливо велике значення має достовірність результатів прогнозування в умовах проведеної структурної реформи галузі.

У прогнозуванні є одна проста істина, до якої прогнозисти прийшли досить давно: висока точність апроксимації даних не гарантує високу точність прогнозів. Це значить, що модель, яка дає найменші помилки по навчальній вибірці, не обов'язково дасть такі ж найменші помилки по тестовій вибірці. Протилежне («чим краще апроксимація, тим точніше прогноз») взагалі можливо лише для оборотних процесів, в яких ніяких якісних змін не відбувається. Але, як ми знаємо, в світі немає нічого більш постійного, ніж зміни.

Втім, окрім цієї простої істини є ще й інша: модель, свідомо погано апроксимуюча ряд даних, навряд чи дасть точний прогноз. Це в свою чергу означає, що для отримання більш точних прогнозів, модель повинна точно описувати ряд по внутрішній вибірці, бути адекватною поставленому завданню і включати всі істотні змінні. Тому що, якщо модель являє собою дуже грубий і умовний опис об'єкта, то по ній можна зробити адекватні висновки про сам об'єкт дослідження.

Як бачимо, перед нами протиріччя: модель повинна добре описувати дані, але хороший опис не гарантує отримання точних прогнозів. Протиріччя вирішується досить легко – дотримуватися серединного шляху. Але як же знайти цю середину? Для цього потрібно просто навчитися оцінювати якість побудованої моделі. А в цьому нам допоможуть різні графіки і ряд коефіцієнтів.

Найпростіший метод оцінки отриманої моделі – лінійний графік. На нього досить нанести фактичні значення, розрахункові і прогнозні. Так ми зможемо побачити, як модель описала дані і наскільки отриманий прогноз відповідає ситуації динаміці. Більш того, так можна зрозуміти (на основі знань про прогнозований процес), наскільки отриманий прогноз правдоподібний.

У ряді випадків по одному лише лінійному графіку буває складно зробити висновки про якість моделі. Наприклад, ті ж самі викиди оцінити по ньому на око непросто. В цьому випадку потрібно звернутися до графіків по залишкам моделі. Навіть простий лінійний графік по залишкам може дати багато корисної інформації.

Однак перш ніж приступати до безпосереднього аналізу, треба зрозуміти, що нам потрібно. В ідеальній моделі залишки ні від чого не залежать, виглядають розподіленими випадково і бажано навіть нормально. Графічно це має виражатися відсутністю будь-якої передбачуваності в залишках і рівними гістограмами і ящічковими діаграмами.

Лінійний графік по залишкам демонструє періодичні коливання (які особливо помітні приблизно з 1986 року) – це все через те, що ми не враховували в моделі сезонність. По залишках її видно більш явно, ніж за графіком по вихідному ряду.

Якщо гістограма по залишкам демонструє явну асиметрію, то це означає що дуже багато помилок лежить вище нуля (праворуч). Це так само вказує на неправильну специфікацію моделі. Зазвичай дослідники при побудові різних моделей намагаються знайти нормально розподілені залишки, але це вимогу на практиці дуже складно задовольнити. Саме тому нам потрібно, щоб вони були

хоча б симетрично розподілені щодо нуля. Це буде вказувати на те, що модель побудована без систематичних помилок.

Ящічкова діаграма показує те саме, що і гістограма: ми маємо справу з розподілом. Крім цього вона показує, що практично всі негативні залишки можна статистично вважати викидами – тобто вони настільки рідко трапляються, що грають деяку роль в описовій здатності моделі. Підвищення середнього значення помилки сигналізує про помилковість специфікації.

Точкова діаграма, побудована за розрахунковими значеннями (Fitted) і абсолютним залишкам моделі будується для додаткової інформації. Вона нам може показати, чи є в моделі гетероскедастичності. Іншими словами, постійна чи дисперсія залишків моделі.

Тепер розглянемо точно такі ж графіки, але вже за моделлю з трендом і сезонністю. Але, звичайно ж, одним графічним аналізом обмежуватися не варто. Очевидно, що око не завжди може побачити те, що легко показав би який-небудь коефіцієнт.

Перша група коефіцієнтів, які можна використовувати для оцінки якості, зазвичай використовується на залишках моделі. Додамо в нашу колекцію два коефіцієнта, які можуть допомогти при оцінці описової здатності моделі. Перший – це коефіцієнт кореляції, розрахований за фактичними і розрахунковими значеннями. Чим ближче коефіцієнт до одиниці, тим в середньому ближче зв'язок між цими значеннями до лінійної, тобто тим точніше описані дані нашою моделлю.

Другий корисний коефіцієнт – коефіцієнт детермінації. Він показує відсоток пояснених моделлю дисперсії і розраховується за формулою:

$$R^2 = 1 - \frac{SSE}{TSS}, \quad (2.1)$$

де $SSE = \sum_{t=1}^T e_t^2$ – це сума квадратів помилок моделі (іноді позначається ще як RSS, SSR);

$$TSS = \sum_{t=1}^T (y_t - \bar{y})^2 - \text{сума квадратів відхилень фактичних значень від середньої}$$

величини.

Тут SSE відповідає Sum of Squared Errors, RSS – Residuals Sum of Squares, SSR – Sum of Squared Residuals, TSS – Total Sum of Squares. Всі ці суми квадратів насправді близькі за змістом до дисперсії залишків і дисперсії по вихідному ряду даних. Просто у формулі (2.1) не відбувається поділ на число спостережень.

Коефіцієнт детермінації більш популярний в регресійному аналізі, ніж в інших розділах прогнозування, але може спокійно використовуватися і при оцінці екстраполяційних моделей. У разі, якщо модель ідеально описує ряд даних, SSE стає рівною нулю, в результаті чого R^2 стає дорівнює одиниці. Якщо ж модель ряд зовсім не описує, а являє собою просто пряму лінію, то коефіцієнт детермінації стає рівним нулю. У випадках з нелінійними моделями коефіцієнт може так само ставати негативним, але при цьому неінтерпретіруємим.

Незважаючи на те, що коефіцієнт детермінації показує цей самий відсоток тієї самої поясненої дисперсії, сильно покладатися на нього не варто. По-перше, він вважається навчальною частиною вибірки, а значить просто показує, наскільки добре ми описали дані. При цьому точність опису не гарантує точність прогнозів. У деяких випадках навіть навпаки: надмірно точний опис призводить до погіршення прогнозних властивостей моделі (так як та починає занадто сильно реагувати на шум).

Але коефіцієнт детермінації при побудові моделей не повинен бути самоціллю. Коефіцієнт може виступати лише індикатором того, наскільки модель адекватна. Низькі значення коефіцієнта детермінації можуть вказувати на те, що модель особливого сенсу не має, але при цьому високі значення не говорять про те, що перед нами гарна модель.

У даний час нараховується понад 150 різних методів прогнозування, однак на практиці використовуються як основні 15-20. Найважливішою

класифікаційною ознакою основних методів прогнозування є ступінь їх формалізації.

2.2 Оцінка якості прогнозних моделей

Основним завданням залізничного транспорту є своєчасне задоволення потреб економіки країни в перевезеннях. Незважаючи на те, що за останні роки відбулося різке зниження обсягів транспортної роботи, залізничний транспорт зберіг своє провідне становище в загальнотранспортному балансі вантажних перевезень України. У сформованих нестабільних і важкопередбачуваних економічних, політичних і соціальних умовах залізничний транспорт продовжує залишатися постійно працюючим і привабливим для більшості вантажовласників видом транспорту.

Оскільки економіка в Україні багато в чому залежить від роботи залізниці, то необдумане управлінське рішення матиме негативний вплив на інші галузі. Без вміння передбачати майбутнє неможливе нормальне функціонування транспорту й отримання максимального прибутку. На сьогодні задача прогнозування є актуальною та невід'ємною частиною щоденної роботи багатьох компаній. На раціональне планування роботи залізничного транспорту великий вплив мають прогнозні значення обсягів перевезень [18].

Проблема розвитку системи прогнозування обсягів вантажних перевезень в сучасних умовах стала особливо актуальною. Аналіз і прогнозування обсягів перевезення вантажів є найважливішим інструментом вироблення ефективних управлінських рішень, вибору оптимальної стратегії розвитку галузі, визначенню необхідного технічного оснащення залізниць, планування потреби в матеріальних, трудових і фінансових ресурсах. Такі дії позитивно повинні вплинути на залучення клієнтів до залізничного транспорту.

Прогнозуванням обсягів перевезення на залізничному транспорті займаються ще недостатньо широко. Сучасні умови функціонування транспорту вимагають збільшити область прогнозування та вдосконалити методологію та методику розробки прогнозів.

Прогнозування (у широкому розумінні) – це наукове передбачення, яке засновано на врахуванні різноманітних чинників, що дозволяють охарактеризувати розвиток об'єкта. Прогноз носить імовірнісний характер і його зв'язок з об'єктом або явищем, що досліджується, не є жорстким та однозначним.

Для отримання адекватності прогнозування обсягів вантажних перевезень, перш за все, треба вибрати метод прогнозування. Метод прогнозування являє собою послідовність дій, які потрібно зробити для отримання моделі прогнозування. Модель прогнозування є функціональним уявленням, що адекватно описує досліджуваний процес та є основою для отримання його майбутніх значень [19]. Модель прогнозування повинна забезпечувати можливість гнучкої адаптації виробничих показників на коливання попиту. Особливо велике значення має достовірність результатів прогнозування в умовах проведеної структурної реформи галузі. Це, в свою чергу, дозволить знизити економічні втрати залізничного транспорту і збільшити прибуток.

За оцінками вчених систематиків прогностики вже налічується понад ста методів прогнозування. На поточний момент розроблено безліч моделей прогнозування часових рядів. У зв'язку з чим, виникає завдання вибору методу прогнозування, який дасть адекватний прогноз обсягів перевезення вантажів залізницею України. Завдання прогнозування часового ряду обсягів перевезення вирішується на основі створення моделі прогнозування. Моделлю прогнозування часового ряду, тобто майбутніх обсягів перевезення вантажів, є функціональне уявлення, що адекватно описує часовий ряд. Від вибору методу аналізу часових рядів істотно залежить швидкість розрахунків і точність отриманих прогнозів.

Основними моделям та методами прогнозування є:

- прогнозна екстраполяція;
- адаптивні методи прогнозування;
- інтуїтивні або експертні методи прогнозування;
- кореляційний та регресійний аналізи;
- моделі стаціонарних та нестаціонарних часових рядів та їх ідентифікація (AR, MA, ARMA, ARIMA);
- методи групового обліку прогнозування;
- теорія розпізнавання образів;
- прогнозування з використанням нейронних мереж, штучного інтелекту та генетичних алгоритмів.

Представлений перелік методів та їх груп не є вичерпним. Нижні рівні класифікації відкриті для внесення нових елементів, які можуть з'явитися в процесі подальшого розвитку інструментарію прогностики. Деякі не названі тут методи, що не представлені в даному переліку, є або їх різновидами, або подальша їх конкретизація.

До групи методів прогнозної екстраполяції можна включити методи найменших квадратів, експоненціального згладжування, імовірнісного моделювання та адаптивного згладжування.

Основу екстраполяційних методів прогнозування складає вивчення часових рядів, що представляють собою впорядковані у часі набори вимірювань тих чи інших характеристик об'єкту або процесу, що досліджується.

Суть методу найменших квадратів полягає в знаходженні параметрів моделі тренду, що мінімізують її відхилення від точок вихідного часового ряду, у вигляді

$$S = \sum_{i=1}^n (\hat{y}_i - y_i)^2 \rightarrow \min, \quad (2.2)$$

де $\hat{y}_t$ – розрахункові значення вихідного ряду;

y_t – фактичні значення вихідного ряду;

n – число спостережень.

Метод найменших квадратів (МНК) широко застосовується для отримання конкретних прогнозів, що пояснюється його простотою і легкістю реалізації на ЕОМ. Недолік методу полягає в тому, що модель тренда жорстко фіксується, і за допомогою МНК можна отримати надійний прогноз на невеликий період попередження. Тому МНК відноситься головним чином до методів короткострокового прогнозування. Крім того, істотними труднощами методу найменших квадратів є правильний вибір виду моделі, а також обґрунтування і вибір ваг у зваженому МНК [20].

Моделі експоненціального згладжування розроблені в середині ХХ століття і до сьогоднішнього дня є широко поширеними в силу їх простоти і наочності. Модель експоненціального згладжування (exponential smoothing, ES) застосовується для моделювання фінансових і економічних процесів [21]. В основу експоненціального згладжування закладена ідея постійного перегляду прогнозних значень по мірі надходження фактичних. Модель ES привласнює експоненціально спадні ваги спостереженням в міру їх старіння. Таким чином, останні доступні спостереження мають більший вплив на прогнозне значення, ніж старші спостереження. Перевагами даного класу моделей є простота і однаковість їх аналізу та проектування, проте недоліком даного класу моделей прогнозування є відсутність гнучкості.

Метод потрійного експоненціального згладжування або, так звана, модель Хольта-Вінтерса – це удосконалена модель Брауна (модель експоненціального згладжування), в якій Хольтом було враховано тренд, а Вінтерс додав сезонну компоненту. В ній, на відміну від моделі Тейла-Вуджа, використовується лінійний тренд, а сезонна компонента містить мультиплікативний характер.

При достатній кількості вихідної інформації імовірнісна модель може дати цілком надійний прогноз. Крім того, ця модель відрізняється великою простотою і наочністю. Оцінки, що отримуються за допомогою цієї моделі,

мають цілком конкретний зміст. Недоліком моделі є вимога більшої кількості спостережень і незнання початкового розподілу, що може привести до неправильних оцінок. Проте, при визначенні процедури початкового розподілу або за допомогою байєсівського методу, коректуючи його, можна розглядати імовірнісну модель як ефективний метод прогнозу [22].

Адаптивна модель прогнозування – це самоналагоджувальна рекурентна модель, здатна відображати яким чином змінюються у часі динамічні властивості часового ряду і враховувати інформаційну цінність його членів. В короткостроковому прогнозуванні вони дозволяють досить точно оцінити значення динамічного ряду. Адаптивне прогнозування дає змогу автоматично змінювати константу згладжування в процесі обчислення. Найважливіша особливість їх полягає у тому, що це саморегульовальні моделі, й у разі появи нових даних прогнози оновлюються із мінімальною затримкою без повторення спочатку всього обсягу обчислень. Адаптивні моделі є досить гнучкими, але мало універсальними, тому при побудові та обґрунтуванні моделей необхідно враховувати найбільш імовірні закономірності розвитку процесу, що досліджується [23]. Адаптивні моделі застосовуються для прогнозування тих економічних процесів, розвиток яких пов'язують з часом. При цьому, основним полем їх використання є складання короткострокових прогнозів. При короткостроковому прогнозуванні, як правило, більш важлива динаміка розвитку досліджуваного процесу, особливо в останній період його розвитку, а не тенденція процесу, що склалася в середньому протягом всього періоду його передісторії.

Прогнозні експертні оцінки відображають індивідуальне судження фахівців щодо перспектив розвитку об'єкту та засновані на мобілізації професійного досвіду та інтуїції. Методи експертних оцінок використовуються для аналізу об'єктів і проблем, розвиток яких або повністю, або частково не піддається математичній формалізації, тобто, для яких важко розробити адекватну модель [24].

Побудова адекватних регресійних моделей для цілей прогнозування за допомогою методу найменших квадратів пред'являє до вихідної інформації досить жорсткі вимоги. Найчастіше, ці вимоги для реальних спостережень виявляються невиконаними, тому одержані оцінки виявляються неефективними, а прогноз – недостовірним. Дійсно, вимога нормальності розподілу помилок, що пред'являється до вихідної інформації процедурою методу найменших квадратів, у більшості випадків виявляється нездійсненою [25].

Авторегресійна модель ковзного середнього в області аналізу часових рядів, яка складається з моделі авторегресії (autoregressive, AR) і моделі ковзного середнього (moving average, MA), найчастіше використовується для прогнозування. В моделі авторегресії AR (p) поточне значення процесу виражається як кінцева лінійна сукупність попередніх значень процесу та імпульсу, який називається “білим шумом”. Інший тип моделі часто використовується спільно з авторегресією називається моделлю змінного середнього порядку q і часто позначається MA (q), де q – порядок змінного середнього. Для досягнення більшої гнучкості в підгонці моделі часто доцільно об'єднати в одній моделі авторегресію та ковзного середнього. Загальна модель позначається ARMA (p, q) і поєднує в собі фільтр у вигляді змінного середнього порядку q і авторегресії фільтрованих значень процесу порядку p . Якщо в якості вхідних даних використовуються не самі значення часового ряду, а їх різниця d -того порядку, то модель носить назву авторегресія проінтегрованого ковзного середнього. У літературі цю модель називають ARIMA (p, d, q) (autoregression integrated moving average). Таким чином, загальна модель, запропонована Боксом і Дженкінсом (1974 р.) [26] включає як параметри авторегресії (p), так і порядок різниці (d) і параметри ковзного середнього (q). В основу авторегресійних моделей закладено припущення про те, що значення процесу $Z(t)$ лінійно залежить від деякої кількості попередніх значень того ж процесу $Z(t-1), \dots, Z(t-p)$. Важливими перевагами даного класу

моделей є їх простота і прозорість моделювання та однаковість аналізу і проєктування [24].

В даний час великої популярності для конкретних задач прогнозування набирають так званий метод групового обліку аргументів (МГОА), представляючи собою подальший розвиток методів регресійного аналізу. Він заснований на деяких принципах теорії навчання й самоорганізації, зокрема на принципі “селекції”, або спрямованого відбору. Метод реалізує завдання синтезу оптимальних моделей високої складності, адекватної складності досліджуваного об’єкту. МГОА реалізує принцип самоорганізації та розвивається як метод перешкодостійкого моделювання [27].

Основні концепції теорії розпізнавання образів засновані на побудові сучасних інформаційних систем, що реалізуються на обчислювальних машинах. Принциповим призначення системи розпізнавання образів є пошук рішень про приналежність до певного класу. З цією метою вводять ряд правил з використанням вирішальних функцій. Розпізнавання образів є один з найважливіших розділів штучного інтелекту та може бути основою автоматизації процесу прийняття рішень [25]. Недоліками даного класу моделей є: велике число параметрів моделі, ідентифікація яких неоднозначна; ресурсомісткість; низька адаптивність моделей; лінійність і, як наслідок, відсутність здатності моделювання нелінійних процесів, що часто зустрічаються на практиці.

При прогнозуванні обсягів перевезення вантажів залізничним транспортом вище наведеними методами, не вдалося досягти бажаної точності в результатах через велику кількість шуму та неможливість описати вплив всіх параметрів. Жорсткі статистичні пропозиції про властивості часових рядів обмежують можливості методів математичної статистики, теорії розпізнавання образів, теорії випадкових процесів та інш. Майже завжди реальні процеси не можуть адекватно бути описані за допомогою традиційних статистичних моделей, оскільки, по суті, є істотно нелінійними, і мають або хаотичну, або квазіперіодичну, або змішану основу.

Для достовірного прогнозування обсягів вантажних перевезень українською залізницею та можливості вилучення прихованої інформації при організації вагонопотоків у роботі було враховано теоретичні й методологічні основи дослідження науковців у галузі планування і прогнозування як на транспорті, так і в інших галузях.

Прогнозування перевезення сировини та готової промисловості необхідне для підвищення точності оцінки пропускної спроможності залізничних мереж. Тут застосовується імітаційне моделювання первинних і вторинних затримок поїздів в графіку руху на ділянці. Вибір варіантів прогнозу, застосовуючи нелінійну функцію тренду для визначення прогнозованого експлуатаційного вантажообігу на наступний період пропонується в [26]. Це дозволить заздалегідь планувати оптимальні маршрути доставки вантажів і сприятиме керівникам транспортних підприємств в поліпшенні системи управління перевізним процесом. Автори роботи [27] представляють простий підхід до прогнозування одновимірних часових рядів, який поєднує в собі поради з кількох узагальнених регресійних нейронних мереж. Запропонований алгоритм виглядає як більш потужний ніж існуючі.

Процес прийняття рішень при плануванні необхідної кількості рухомого складу вважається одним з найбільш проблемних питань для транспортної галузі. В роботі [28] розроблено підхід до визначення розміру флоту при авіаперевезеннях за допомогою моделювання методом Монте-Карло. Застосовуючи цей метод, авіакомпанія отримує максимальний прибуток. Така процедура рішення може бути застосована і на залізничному транспорті для виявлення необхідної кількості вагонів для перевезення вантажу, що прогнозується.

Для планування роботи вантажного транспорту в [29] пропонується алгоритм нечіткої регресії з точним передбаченням і пристосованості системи до реальної ситуації. А також розроблена нейронна мережа зі зворотним поширенням помилки для прогнозування вартості вантажних перевезень. Автори стверджують, що алгоритм нечіткої регресії є більш ефективним ніж

нейронна мережа при великомасштабних плануванні та прогнозуванні. При цьому, в роботі [30] зазначається, що для досягнення точного довгострокового прогнозу краще застосовувати нейронну мережну модель. Така модель дає більш точні результати прогнозування ніж підходи, що засновані на теорії хаосу. В дослідженні [31] зазначається, що задача прогнозування майбутніх значень часового ряду є основою для фінансового планування в економіці. На основі історичних значень часових рядів робиться планування роботи підприємства, управління та оптимізація обсягів виробництва і складського контролю. Емпіричні результати підтверджують, що штучна нейронна мережа є ефективним інструментом для прогнозування валютного курсу. Ця методика дає докази того, що існує можливість витягнути приховану інформацію для достовірного прогнозування майбутнього.

Прогнозування потоків є важливим компонентом транспортних систем. Прийняття необґрунтованих рішень при перевезенні вантажів веде до росту грошових витрат залізничної галузі. Управління перевезеннями повинно забезпечувати вибір і здійснення тільки оптимальних рішень, які можуть комплексно оцінювати показники транспортних засобів для різних варіантів перевезень [32].

Проведений експеримент в [33] показав високу точність прогнозу при короткостроковому прогнозуванні пасажиропотоку. Результат прогнозування може бути застосований для планування вантажних операцій та управління доходами галузі. Для моделювання вантажних перевезень в статті [34] описується підхід з використанням штучних нейронних мереж та нейронечіткої системи виведення. Такий підхід поєднує в собі здібності до навчання штучних нейронних мереж і прозорий характер нечіткої логіки. Модель виявляється вельми адаптивною й ефективною при дослідженні нелінійних взаємозв'язків між різними змінними. Використовуючи інформацію про вантажні потоки, цей підхід можливо застосувати і на українській залізниці.

У статті [35] розроблена нейромережева модель прогнозування параметрів вантажопотоку, яка дозволяє отримати прогнозне значення з

урахуванням динаміки зміни параметрів по окремих позиціях часового лага. Запропонована модель дає можливість описати динаміку зміни прогнозованих показників в процесі навчання, що забезпечує гнучкість прогнозних моделей і, як результат, – точність прогнозу.

З урахуванням раніше виконаних досліджень в області управління вагонопотоками необхідністю стала розробка сучасної методології прогнозування обсягів вантажних перевезення з використанням новітніх математичних методів і моделей з їх адаптацією до особливостей ринку транспортних послуг. Крім того, необхідність використання розробок в практиці прогнозування в реальних умовах накладає певні вимоги до підбору математичного апарату – він повинен поєднувати в собі переваги інших методів й одночасно відрізнятися простотою і наочністю в застосуванні, максимально базуватися на наявній у розпорядженні залізничного транспорту інформації.

З метою підвищення точності результатів прогнозування і збільшення швидкості обробки даних часового ряду, найбільш перспективним є створення комбінованих моделей за допомогою штучних нейронних мереж, що неодноразово доводиться науковцями у вищезазначених працях в різних сферах діяльності.

Тобто адекватним апаратом для вирішення завдань діагностики і прогнозування обсягів перевезень можуть служити спеціальні штучні мережі (англ. artificial neural network, ANN). В основі нейроінтелекта лежить нейронна організація штучних систем, яка має біологічні передумови. Здатність біологічних систем до навчання, самоорганізації та адаптації має більшу перевагу в порівнянні із сучасними обчислювальними системами. Даний спосіб прогнозування володіє високими властивостями адаптації до змінних вхідних даних за рахунок самонавчання. Основною перевагою нейромережевих моделей є нелінійність, тобто здатність встановлювати нелінійні залежності між майбутніми та фактичними значеннями процесів. Іншими важливими перевагами є: адаптивність, масштабованість (паралельна структура ANN прискорює обчислення) і однаковість їх аналізу та проектування. При цьому

недоліками ANN є відсутність прозорості моделювання, складність вибору архітектури, високі вимоги до несуперечності навчальної вибірки, складність вибору алгоритму навчання та ресурсомісткість процесу їх навчання [36, 37].

Штучна нейронна мережа представляє собою систему з'єднаних і взаємодіючих між собою штучних нейронів. Штучний нейрон імітує властивості біологічного нейрона. Математично, штучний нейрон зазвичай представляють як деяку нелінійну функцію від єдиного аргументу – лінійної комбінації всіх вхідних сигналів. На вхід штучного нейрона поступає множина сигналів, що позначені $x_1, x_2, \dots, x_n$, які є виходами інших нейронів. Кожен вхід множиться на відповідну вагу, пропорційну синаптичній силі $w_1, w_2, \dots, w_n$ і поступає на сумуючий блок, позначений Σ . Кожен зв'язок характеризується своєю вагою. Зв'язки з позитивною вагою називаються збудливими, а з негативною – гальмівними. Множина ваг в сукупності позначається вектором W . Всі виходи підсумовуються. Сумуючий блок, який відповідає тілу біологічного нейрона, складає зважені входи алгебраїчно, створюючи вихід S , який визначає рівень активації нейрона [31]. Нейрон має один вихід, який часто називають аксоном, за аналогією з біологічним прототипом. З єдиного виходу нейрона сигнал може надходити на довільне число входів інших нейронів. На рисунку 2.1 представлена структура штучного нейрона, що реалізує цю ідею.

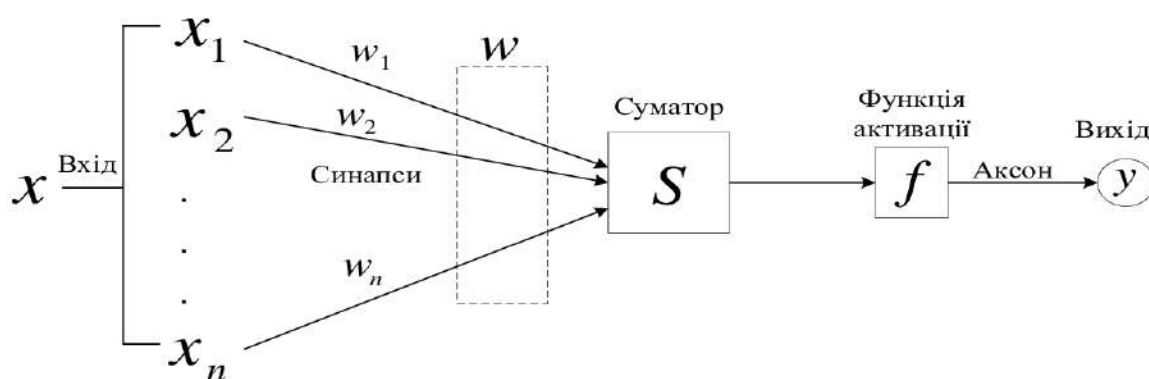


Рисунок 2.1 – Структура штучного нейрона

Хоча мережеві парадигми досить різноманітні, в основі майже всіх їх лежить ця конфігурація.

Математично структуру нейрона можна описати парою рівнянь

$$y = f(s), \quad (2.3)$$

$$S = \sum_{i=1}^n w_i x_i + w_0, \quad (2.4)$$

де x_i , w_i – відповідно сили на входах в нейронах і величини синаптичних зв'язків;

w_0 – коефіцієнт зміщення нейрону (вага додаткового входу);

S – індуковане локальне поле;

$f(s)$ – передавальна функція або функція активації.

Додатковий вхід і відповідна йому вага використовується для ініціалізації нейрона. Під ініціалізацією мається на увазі зсув активаційної функції нейрона по горизонтальній осі, тобто формування порогу чутливості нейрона. Крім того, іноді до виходу нейрона спеціально додають якусь випадкову величину, яка називається зсувом. Зсув можна розглядати як сигнал на додатковому, завжди навантаженому синапсі.

Спосіб зв'язку нейронів визначає архітектуру нейронної мережі. Згідно з працею [30], у залежності від способу зв'язку нейронів, мережі діляться на:

- мережі прямого поширення – всі зв'язки направлені строго від вхідних нейронів до вихідних. До таких мереж відносяться, наприклад: найпростіший перцептрон (розроблений Розенблаттом) і багатошаровий перцептрон;

- рекурентні нейронні мережі – сигнал з вихідних нейронів або нейронів прихованого шару частково передається назад на входи нейронів вхідного шару;

– радіально базисні функції – вид нейронної мережі, що має прихований шар з радіальних елементів і вихідний шар з лінійних елементів. Мережі цього типу досить компактні і швидко навчаються. Радіально базисна мережа володіє наступними особливостями: один прихований шар, тільки нейрони прихованого шару мають нелінійну активаційну функцію, а синаптичні ваги вхідного і прихованого шарів дорівнюють одиниці;

– самоорганізаційні карти або Мережі Кохонена – такий клас мереж, як правило, навчається без вчителя і успішно застосовується в задачах розпізнавання. Мережі такого класу здатні виявляти новизну у вхідних даних: якщо після навчання мережа зустрінеться з набором даних, несхожим ні на один з відомих зразків, то вона не зможе класифікувати такий набір і тим самим виявить його новизну. Мережа Кохонена має всього два шари: вхідний і вихідний, складений з радіальних елементів.

Методи прогнозування обсягів перевезень класифікуються за різними ознаками, зокрема за характером інформації, способом обробки даних та рівнем формалізації.

За характером інформації виділяють якісні та кількісні методи.

Якісні методи базуються на експертних оцінках і застосовуються у випадках, коли відсутні достатні статистичні дані або коли об'єкт прогнозування є складним і багатфакторним. Вони дозволяють врахувати досвід фахівців і специфіку галузі.

Кількісні методи, навпаки, базуються на використанні математичних і статистичних моделей. Вони забезпечують більш точні результати за умови наявності достатнього обсягу даних.

За часовим горизонтом прогнозування розрізняють:

- короткострокові прогнози;
- середньострокові прогнози;
- довгострокові прогнози.

Короткострокові прогнози використовуються для оперативного управління, тоді як довгострокові – для стратегічного планування.

Якісні методи прогнозування відіграють важливу роль у випадках, коли кількісні дані є обмеженими або недостатньо репрезентативними. Вони дозволяють врахувати думку експертів, досвід практиків та специфіку галузі.

Метод експертних оцінок передбачає залучення фахівців для оцінки майбутніх тенденцій розвитку. Експерти аналізують поточну ситуацію, враховують можливі зміни та формують прогнозні оцінки. Перевагою цього методу є можливість врахування факторів, які важко формалізувати. Недоліком є суб'єктивність оцінок.

Метод Дельфі є різновидом експертного оцінювання, що передбачає багатоетапне опитування експертів із забезпеченням анонімності їх відповідей. Це дозволяє уникнути впливу авторитетів і досягти більш об'єктивних результатів.

Сценарний підхід передбачає розробку кількох можливих варіантів розвитку подій:

- оптимістичного;
- песимістичного;
- базового.

Цей метод дозволяє врахувати невизначеність і підготуватися до різних варіантів розвитку ситуації.

Кількісні методи прогнозування є основою сучасного аналізу транспортних процесів. Вони базуються на використанні статистичних даних і дозволяють отримати обґрунтовані результати.

До основних кількісних методів належать: методи екстраполяції; аналіз часових рядів; економетричні моделі. Ці методи широко застосовуються в практиці прогнозування обсягів перевезень на залізничному транспорті.

Методи екстраполяції базуються на припущенні, що закономірності, виявлені в минулому, зберігаються в майбутньому. Вони є одними з найпростіших і найбільш поширених методів прогнозування. Основною перевагою методів екстраполяції є їх простота та доступність. Водночас вони мають обмеження, пов'язані з неможливістю врахування різких змін

зовнішнього середовища. Методи екстраполяції доцільно застосовувати для короткострокових прогнозів у стабільних умовах.

Аналіз часових рядів дозволяє дослідити динаміку змін обсягів перевезень у часі. Він передбачає виділення таких компонентів, як: тренд; сезонність; циклічність; випадковість коливань. Використання часових рядів дозволяє врахувати складну структуру транспортних потоків і підвищити точність прогнозів.

Обсяги перевезень на залізничному транспорті формуються під впливом великої кількості факторів, які можна згрупувати наступним чином:

- економічні фактори, до яких належать рівень розвитку економіки, обсяги промислового виробництва, структура експорту та імпорту;
- технічні фактори. До них відносяться стан інфраструктури, рівень зносу основних фондів, наявність рухомого складу;
- соціальні фактори – рівень доходів населення, мобільність, демографічні процеси;
- політичні фактори – державна політика, міжнародні відносини, регуляторне середовище;
- природні фактори, до яких відносяться погодні умови та сезонні коливання.

Кількісні методи прогнозування займають провідне місце у сучасних дослідженнях транспортних процесів, оскільки забезпечують високий рівень обґрунтованості результатів і дозволяють враховувати складні взаємозв'язки між показниками.

У практиці залізничного транспорту найчастіше використовуються статистичні та економетричні підходи, які базуються на аналізі великих масивів даних. Їх застосування дозволяє виявити закономірності зміни обсягів перевезень, оцінити вплив окремих факторів та сформувати достовірні прогнози.

Особливістю кількісних методів є їх залежність від якості вихідної інформації. Наявність повних, достовірних і систематизованих даних є

необхідною умовою отримання точних результатів. У випадку залізничного транспорту це можуть бути дані про вантажообіг, пасажиропотоки, структуру перевезень, економічні показники регіонів тощо.

Дослідження методів прогнозування, їх переваги та недоліки, а також доцільність застосування для прогнозування обсягів вантажних перевезень наведено у таблиці 2.1.

Таблиця 2.1 – Порівняння прогнозних моделей вантажних перевезень

Метод прогнозування	Переваги	Недоліки	Доцільність застосування для прогнозування вантажних перевезень
Метод середнього приросту	Простота розрахунків, не потребує спеціального програмного забезпечення	Низька точність при коливаннях обсягів перевезень	Низька
Метод ковзної середньої	Згладжує випадкові коливання, простий у використанні	Не враховує тенденцію розвитку	Середня
Метод експоненціального згладжування	Враховує останні зміни показників, достатня точність для короткострокових прогнозів	Зниження точності при різких структурних змінах	Висока
Лінійна регресія (трендова модель)	Виявляє тенденцію зміни обсягів перевезень, простота інтерпретації	Не враховує сезонність	Висока

Продовження таблиці 2.1

Поліноміальна регресія	Дозволяє врахувати нелінійний характер зміни показників	Можливе перенавчання моделі	Висока
ARIMA-модель	Висока точність прогнозування часових рядів	Складність налаштування та розрахунків	Дуже висока
Нейромережеві моделі	Враховують складні залежності між факторами	Потребують великого обсягу даних	Перспективна

Найбільш перспективним та потужним методом прогнозування виявилась нейромережева модель.

Висновок. Прогнозування відіграє ключову роль у формуванні стратегії розвитку залізничного транспорту. Воно дозволяє визначити пріоритетні напрями розвитку, оцінити ефективність інвестицій і забезпечити сталий розвиток галузі. Особливо актуальним є використання прогнозування в умовах інтеграції України до європейської транспортної системи, що потребує адаптації до нових стандартів і вимог. Важливим аспектом є також вибір адекватної моделі прогнозування. Неправильно обрана модель може призвести до значних похибок, що негативно вплине на управлінські рішення.

3 Формування моделі прогнозування обсягів перевезення вантажів залізничним транспортом

3.1 Виявлення структури часового ряду обсягів перевезення вантажів залізницею України

Модель прогнозування повинна забезпечувати можливість гнучкої адаптації виробничих показників на коливання попиту. Особливо велике значення має достовірність результатів прогнозування в умовах проведеної структурної реформи галузі. Нейронні мережі переважно ефективні для систем, яким властивий високий ступінь нелінійності. Для того, щоб оцінити спроможність нейронної мережі ефективно спрогнозувати обсяги перевезень вантажів залізничним транспортом, перш за все, треба проаналізувати попередні статистичні дані вантажоперевезень.

Прогноз майбутніх значень часового ряду використовується для ефективного прийняття управлінських рішень. Аналіз часових рядів допоможе визначити природу ряду і спрогнозувати майбутні значення часового ряду. Виявлення структури часового ряду необхідно для побудови математичної моделі прогнозування обсягів перевезення вантажів залізничним транспортом. При прогнозуванні часового ряду потрібно визначити функціональну залежність, що адекватно описує часовий ряд. Метою створення моделі прогнозування є отримання такої моделі, для якої середнє абсолютне відхилення фактичного значення від прогнозованого прагне до мінімального для заданого горизонту, який називається часом попередження. Після того, як модель прогнозування часового ряду визначена, потрібно обчислити майбутні значення часового ряду, а також їх довірчий інтервал.

Аналіз часового ряду виконані за допомогою програмного продукту STATISTICA. Виробником програми є фірма StatSoft Inc. (США).

Перед початком реалізації моделі прогнозування було проведено статистичний аналіз часового ряду. Прогнозування проводилось на основі статистичних даних обсягів перевезення зерна та продуктів перемолу з 2004 р. по 2020 р. (рисунок 3.1).

Нестационарність часового ряду очевидна. Характер тренду склав 1,7.

За допомогою спектрального аналізу в структурі часового ряду визначимо пік відхилень від тренда, що дозволяє розрахувати тривалість періодичної компоненти ряду. Математичною основою спектрального аналізу сигналів є перетворення Фур'є. Перетворення Фур'є дозволяє уявити безперервну функцію $f(x)$ (сигнал), що визначена на відрізку $\{0;T\}$ у вигляді суми нескінченного числа (нескінченного ряду) тригонометричних функцій (синусоїд і/або косинусоїд) з певними амплітудами і фазами, що також розглядаються на відрізку $\{0;T\}$. Для виділення циклічності застосовано одновимірний спектральний аналіз Фур'є, який є одним з основних методів моделювання сезонних і циклічних коливань.

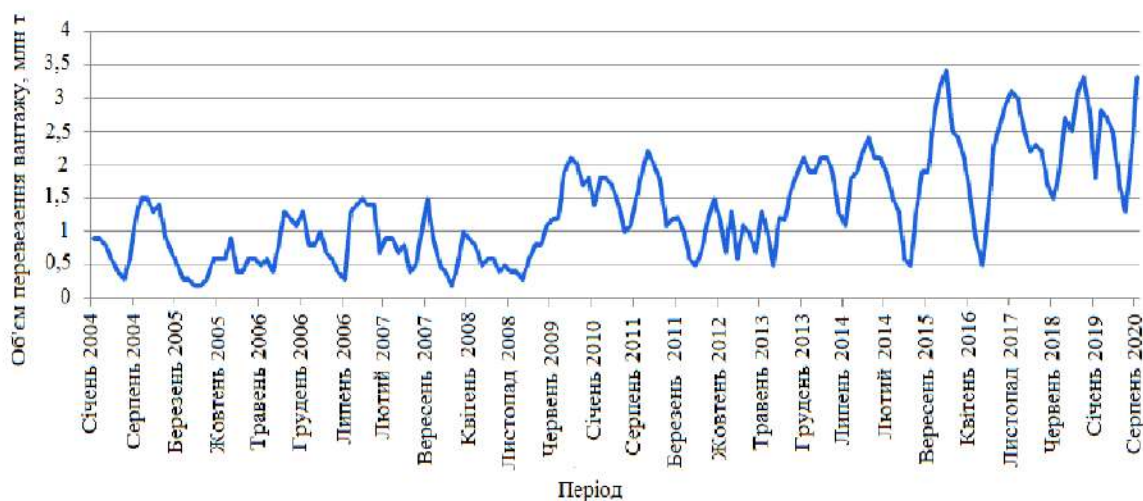


Рисунок 3.1 – Обсяги перевезення зерна та продуктів перемолу

Сезонні коливання, що розкладені в ряд Фур'є, є сумою декількох синусоїдальних і косинусоїдальних гармонік з різними періодами, що можна представити наступною формулою

$$y_t = \sum_{k=1}^{\infty} (u_k \cos w_k t + v_k \sin w_k t), \quad (3.1)$$

де u_k , v_k – некорельовані випадкові величини з нульовим математичним очікуванням і однаковими дисперсіями;

w_k – довжина хвилі функції синуса або косинуса, тобто частота.

Результат періодограми спектрального аналізу часового ряду наведено на рисунку 3.2.

В структурі часового ряду чітко прослідковується сезонна компонента, тому можна зробити припущення, що лаг сезонності складає 12 місяців. Також наявна певна циклічність в 3–4 роки. Проте дана циклічність має набагато слабший вплив, ніж сезонна компонента.

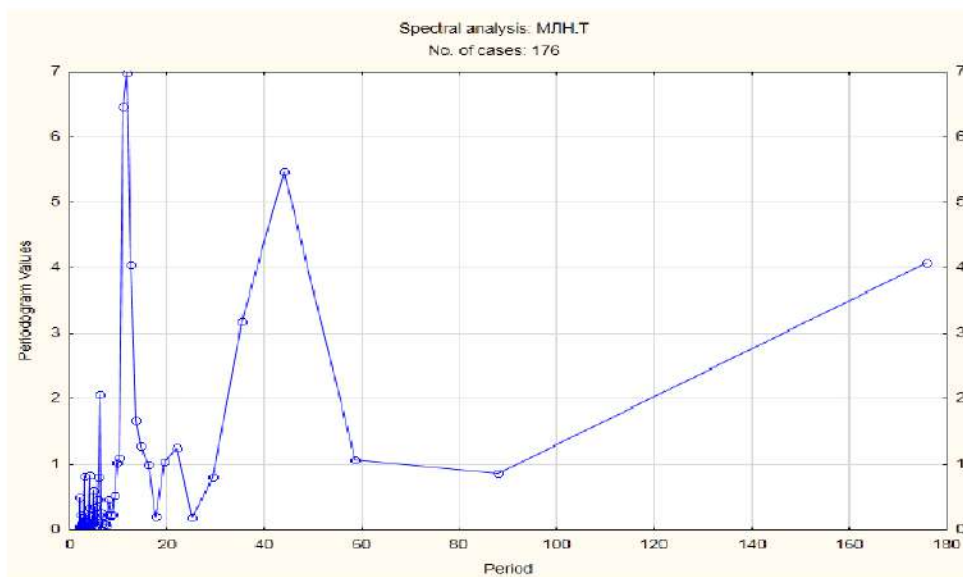


Рисунок 3.2 – Спектральний аналіз часового ряду

Сезонність перевезення спостерігається не для всіх видів вантажу. Так, при дослідженні обсягів перевезення залізничних вантажів коефіцієнт нерівномірності склав 1,1.

Сезонна компонента впливає на завантаженість рухомого складу та транспортної інфраструктури. У періоди масового навантаження сезонних вантажів може виникнути дефіцит у вагонах (зерновозах) та у пропускній здатності станцій та дільниць. Таке становище веде до збільшення експлуатаційної роботи залізниць і, тим самим, приведе до фінансових втрат галузі. Тому необхідною складовою нормального функціонування залізничного транспорту є питання достовірного прогнозування обсягів перевезення вантажу. Особливу увагу заслуговують сезонні вантажі.

3.2 Розробка моделі прогнозування обсягів перевезення вантажів та перевірка результатів прогнозування на точність

Ймовірно, архітектура багат шарових нейронних мереж використовується зараз найбільш часто. Зазвичай мережа складається з безлічі сенсорних елементів (вхідних вузлів), які утворюють вхідний шар, одного або декількох прихованих шарів обчислювальних нейронів і одного вихідного шару нейронів. Багат шарова нейронна мережа може моделювати функцію практично будь-якого ступеня складності, причому число шарів і число елементів в кожному шарі визначають складність функції. Визначення числа проміжних шарів і числа елементів в них є важливим питанням при конструюванні [32].

Залізничний транспорт – система доволі інерційна. Приймати оперативні управлінські рішення складно. Для ефективної роботи галузі треба якісне прогнозування для прийняття тактичних управлінських рішень за деякий час до настання події. Тому для прогнозування обсягів перевезення вантажів було

застосовано повнозв'язний багат шаровий персептрон (MLP, Multilayer perceptron) Румельхарта з прямим поширенням. Сигнали поширюються в одному напрямку, починаючи від вхідного шару нейронів, через приховані шари до вихідного шару і на виході нейрона отримуємо результат опрацювання сигналу.

Персептрон будується для нелінійного нейрона, а саме моделі нейрона Мак-Каллока–Пітца. Кожен нейрон j в будь-якому шарі l пов'язаний зі всіма нейронами (вузлами) попереднього шару. Підсумовуючий вузол обчислює лінійну комбінацію вхідних сигналів, що надходять на синапси $\omega_{l,j,i}$. Отримана сума (так зване індуковане локальне поле (induced local field)) $s_{l,j}$ передається в функцію активації, що пов'язана з нейроном j . Функція активації $y_{l,j}$ відповідного нейрона j описує нелінійний взаємозв'язок вхідного та вихідного сигналів цього нейрона.

Архітектуру нейронної мережі наведено на рисунку 3.3.

На рисунку 3.3 синаптичні зв'язки персептрона зазначені $\omega_{l,j,i}$, при цьому, l – індекс номера шару персептрона, $l=0...L$, де L – кількість шарів; j – індекс нейрона в шарі, $j=0...n_l$, де n_l – кількість нейронів в шарі l ; i – індекс вагового коефіцієнту, $i=1...m_{l,j}$, де $m_{l,j}$ – кількість вагових коефіцієнтів в шарі l , нейрона j . Сигнали, що надходять на вхід персептрона, зазначені $x_1, x_2, x_3, \dots, x_8$.

Виходячи зі структури моделі, можна визначити, що вхідний сигнал (на першому шарі) індукованого локального поля або суматора набуває вигляд

$$S_{0,j} = \sum_{i=1}^{m_{0,j}} x_{0,j} \omega_{0,j,i} + \omega_0. \quad (3.2)$$

Суматор нейронів на другому шарі розраховується за наступною формулою

$$S_{1,j} = \sum_{i=1}^{m_{1,j}} y_{1,i} \omega_{1,j,i}, \quad (3.3)$$

де $y_{1,i}$ – функція активації нейронів першого шару.

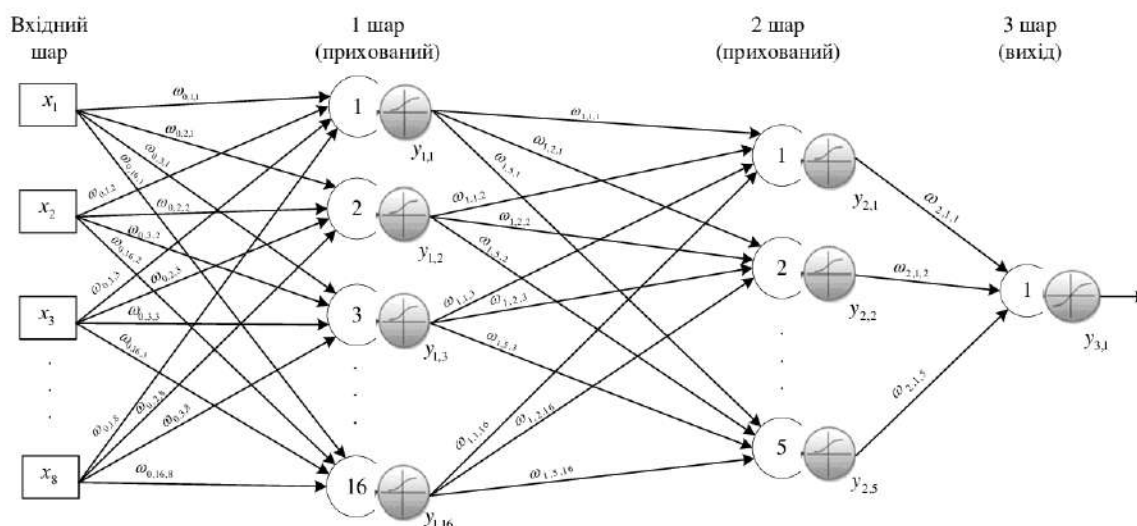


Рисунок 3.3 – Архітектура багатошарового персептрона

Індуковане локальне поле на третьому (вихідному) шарі визначається

$$S_{2,j} = \sum_{i=1}^{m_{2,j}} y_{2,i} \omega_{2,j,i}, \quad (3.4)$$

де $y_{2,i}$ – функція активації нейронів другого шару.

Функція активації вхідного шару – тотожна, тобто вхідні сигнали ніяк не перетворюються, а передаються на наступний шар. В даній мережі, на відміну від її попередника персептрона Розенблатта, на прихованих шарах використовуються нелінійні функції активації, а саме сигмоїд. Він дозволяє підсилювати слабкі сигнали і не перенасичуватися потужними сигналами. Подібна нелінійна функція активації вирішує дилему шумового насичення. На прихованих шарах застосовується логістична функція (3.5) та її графічна

інтерпритація (рисунок 3.4 а), а на вихідному – гіперболічний тангенс (3.6) та відповідний графік (рисунок 3.4 б)

$$y_{l,j} = f(S) = \frac{1}{1 + e^{-aS}}, \quad (3.5)$$

$$y_{3,l} = f(S) = \frac{e^{aS} - e^{-aS}}{e^{aS} + e^{-aS}}, \quad (3.6)$$

де a – параметр нахилу функції активації.

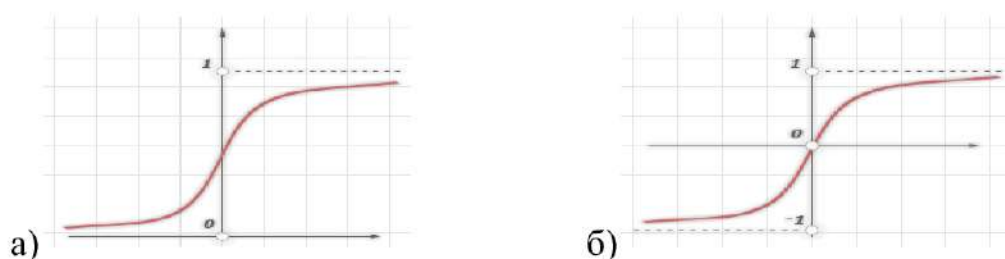


Рисунок 3.4 – Графіки функцій активації

Навчання з учителем багатoshарового персептрона виконується за допомогою алгоритму зворотного поширення помилки (error back-propagation algorithm). Цей алгоритм заснований на корекції помилок (error-correction learning rule).

Навчання персептрона Румельхарта здійснюється до тих пір, поки вагові коефіцієнти не будуть стабілізовані. Для того, щоб визначати стан вагових коефіцієнтів необхідно розрахувати помилку персептрона на всіх навчальних вибірках. Найкраща достовірність даних нейронної моделі досягається при двох вибірках: одна навчальна вибірка, інша – перевірна. Тому для навчальної вибірки було відведено 90 % значень, а для контрольної – 10 %. В якості вхідних даних були використані статистичні спостереження про обсяги перевезень зернових вантажів та продуктів перемолу з 2004 по 2020 рік.

Розрахунок помилки персептрона було здійснено шляхом суми різниці квадратів у вигляді

$$E = \frac{1}{2} \sum_p^P (y_{L,j} - d_{p,j})^2, \quad (3.7)$$

де p – індекс навчального прикладу в P навчальній вибірці, $p = 0, \dots, P$;

$y_{L,j}$ – вихід нейрона в останньому шарі;

$d_{p,j}$ – бажане значення нейрона на вихідному значенні.

Розрахунок помилки цим методом здійснювався після кожної епохи навчання. Епоха навчання – це прогін навчальної вибірки.

Для коректування вагових коефіцієнтів їх змінення було здійснено за допомогою методу градієнтного спуску, який, у свою чергу, має швидкість навчання $\eta = 0,65$, тобто його умова в межах $0 < \eta < 1$ була виконана. Коректування вагових коефіцієнтів здійснювалось у вигляді

$$\Delta \omega_{l,j,i} = \eta \frac{\partial E}{\partial \omega_{l,j,i}}. \quad (3.8)$$

Помилка нейрону δ розраховувалась наступним чином:

$$\delta_{l,j} = \frac{\partial E}{\partial y_{l,j}} \cdot \frac{dy_{l,j}}{dS_{l,j}} = \left[\sum_{k=0}^{n_{l+1}} \delta_{l+1,k} \omega_{l+1,k,j} \right] \cdot \frac{dy_{l,j}}{dS_{l,j}} = \left[\sum_{k=0}^{n_{l+1}} \delta_{l+1,k} \cdot \omega_{l+1,k,j} \right] \cdot f'(S_{l,j}), \quad (3.9)$$

де k – індекс помилки нейрона на наступному шарі, $k = 0, \dots, n_{l+1}$.

Помилка нейрону останнього шару визначалась за допомогою формули:

$$\delta_{l,j} = (y_{L,j} - d_{p,j}) \cdot f'(S_{L,j}). \quad (3.10)$$

Після навчання персептрона методом зворотного поширення помилки на виході нейрона отримано прогностні значення обсягів перевезення вантажу залізничним транспортом.

Реалізацію прогнозування виконано за допомогою програмного продукту STATISTICA. Результати прогнозування наведено на рисунку 3.5.

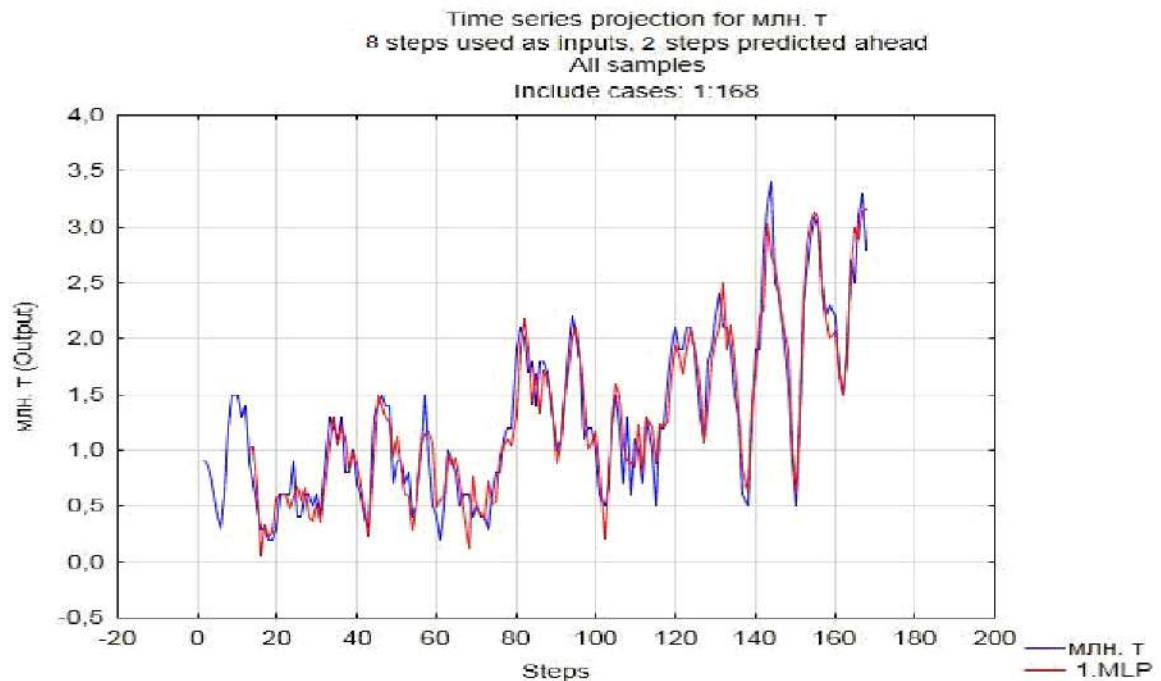


Рисунок 3.5 – Порівняння прогностного ряду обсягів перевезення вантажів з реальними значеннями

Залежність між вхідними та вихідними даними обсягів перевезення представлена на рисунку 3.6.

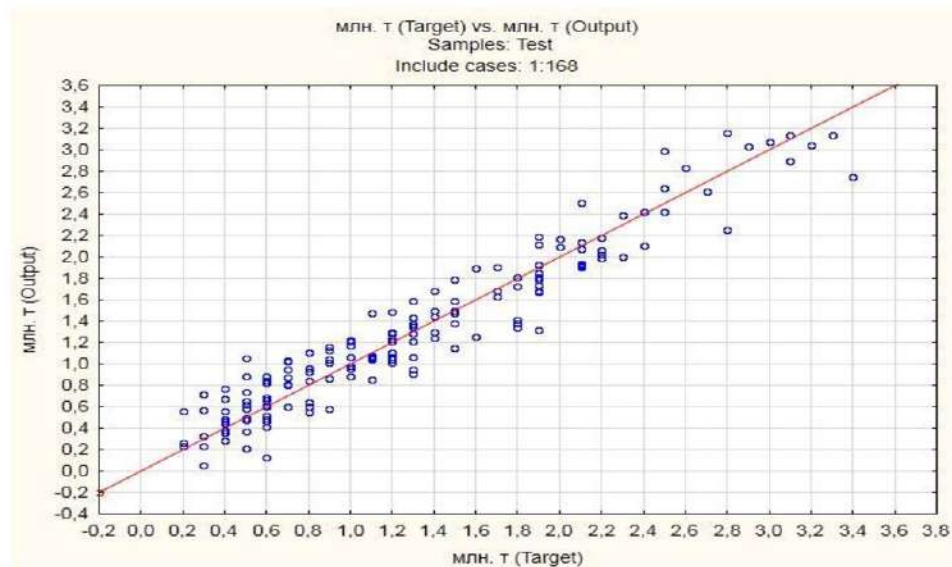


Рисунок 3.6 – Графік залежності між вхідним та вихідним сигналами
обсягів перевезення

Судячи з рисунка 3.6, можна зробити висновок, що мережа “вловлює” загальну тенденцію ряду.

Після того, як побудована прогнозна модель, що включає тенденцію й сезонні коливання було знайдено та проаналізовано залишки моделі. Залишки моделі (або помилки) – це основна величина, через яку оцінюється точність прогнозу. У загальному вигляді це різниця між спрогнозованими значеннями і фактичними даними. Чим більше залишки тим сильніше ми помилилися. В ідеальному випадку графік залишків нагадує нормальний закон розподілу та має дзвоноподібну форму. Тобто, про адекватність моделі можна судити за діаграмою розподілу залишків моделі, що наведено на рисунку 3.7.

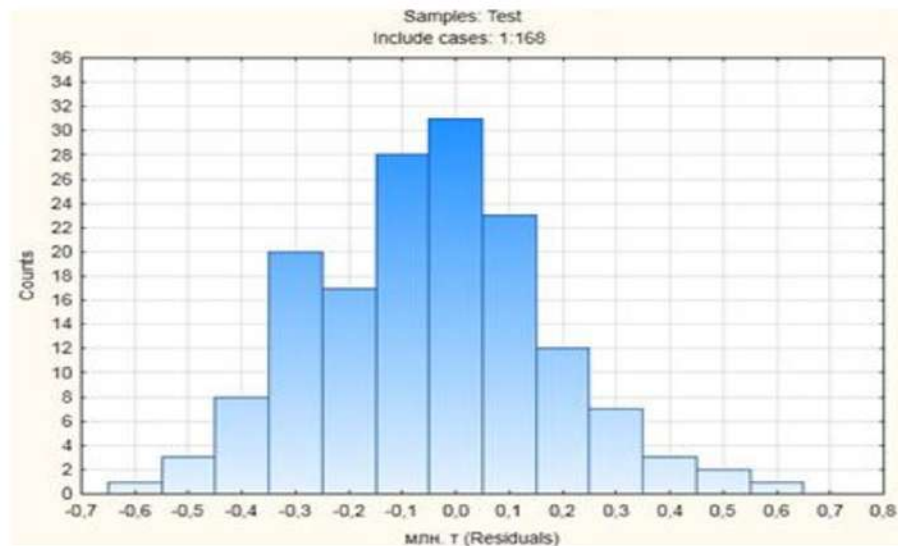


Рисунок 3.7 – Діаграма розподілу залишків моделі

В якості тестової вибірки для крос-перевірки були використані реальні значення обсягів перевезень за 8 місяців 2024 року. Результати крос-перевірки зображено на рисунку 3.8.

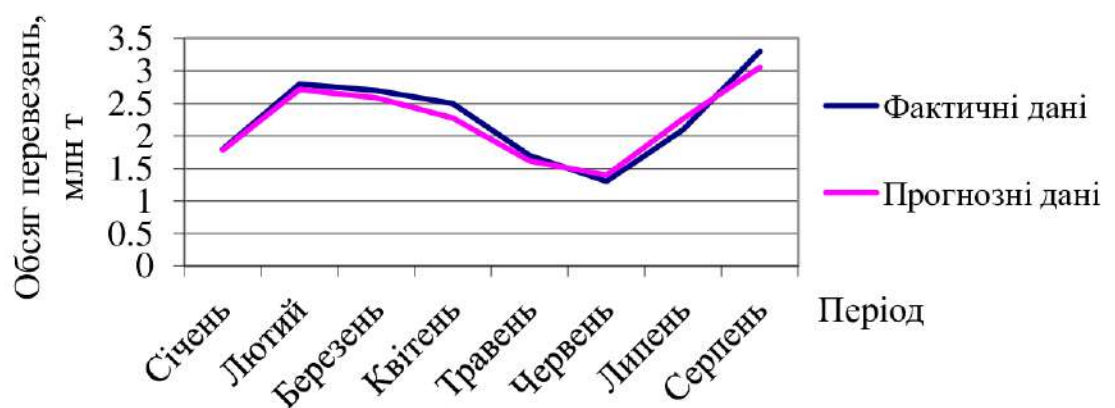


Рисунок 3.8 – Порівняльний графік прогнозних та фактичних обсягів перевезень зерна та продуктів перемолу за 8 місяців 2023 р.

Перевірка на адекватність запропонованої нейронної мережі для прогнозування обсягів перевезення зерна та продуктів перемолу проведена за допомогою використання коефіцієнту розбіжності прогнозу, що

запропонований Г.Тейлом [32]. Чим ближче значення коефіцієнта до нуля, тим краще є збіг прогнозів з фактичних даними. Результати розрахунків наведено в таблиці 3.1.

Якість та надійність прогновної нейромережевої моделі визначено через значення MAPE, що характеризує відносну точність прогнозу, і визначається за формулою

$$MAPE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{|Y_t - \hat{Y}_t|}{Y_t} \cdot 100 \% , \quad (3.11)$$

де n – кількість періодів, що досліджуються.

MAPE склала 5,56 %, що свідчить про високу точність прогнозування. Враховуючи, що залізничний транспорт є досить інерційною системою, такий показник є достатніми для прийняття управлінських рішень.

Таблиця 3.1 – Оцінка точності прогнозування обсягів перевезення зерна та продуктів перемолу, на основі запропонованої нейронної мережі

Період	Фактичні дані Y_t , млн. т	Прогнозні дані $\hat{Y}_t$, млн. т	Помилка прогнозу $Y_t - \hat{Y}_t$, млн. т	Коефіцієнт розбіжності прогнозу $k_T = \frac{\sqrt{\sum (\hat{Y}_t - Y_t)^2}}{\sqrt{\sum Y_t^2}}$
Січень	1,8	1,786232	0,013768	0,007649
Лютий	2,8	2,713318	0,086682	0,030958
Березень	2,7	2,588141	0,111859	0,041429
Квітень	2,5	2,277128	0,222872	0,089149
Травень	1,7	1,618872	0,081128	0,047722
Червень	1,3	1,396673	-0,096673	0,074364
Липень	2,1	2,266609	-0,166609	0,079338
Серпень	3,3	3,055446	0,244554	0,074107

На формування явища, що досліджується, завжди впливає безліч різноманітних факторів. Слід зазначити, що точність одиничного прогнозу не дає однаковий результат при наступних розрахунках. Повний збіг або значне розходження прогнозу та його реалізації може бути наслідком особливо сприятливих або несприятливих обставин. Одиничний “хороший” прогноз може бути отриманий і по “поганій моделі” і навпаки. Але перевагами нейронної мережі є здатність до навчання. Отже про якість прогнозів можна судити лише при сукупності зіставлення прогнозів з їх реалізацією [40].

Сформована прогнозна модель за допомогою нейронної мережі відноситься до класу високоточних. Такий математичний апарат може бути використаний для знаходження прогнозних даних на залізничному транспорті.

3.3 Удосконалення процедури визначення завантаженості залізничної інфраструктури

Технологія організації перевезення вантажів повинна будуватися на раціональному використанні рухомого складу для виконання запланованих обсягів перевезення. Складання плану розподілення вагонів в основному залежить від кількості вагонів, що необхідні для перевезення. Також важливим параметром планування є місце знаходження вагонів у конкретний період часу [41].

При розрахунку плану формування поїздів та оперативного плану управління вагонами основним критерієм вибору просування вагонопотоків є мінімум експлуатаційних витрат. Але однаковий підхід до розрахунку плану перевезення для різних видів вантажів не є оптимальним. Тому для знаходження оптимального варіанту переміщення вагонів пропонується враховувати параметр нерівномірності перевезень або сезонність. Наведені вище дослідження показали, що для різних вантажів коефіцієнт нерівномірності

перевезень нерівнозначний. Вибір раціонального плану розподілу вагонів на залізничній мережі представлено у вигляді цільової функції:

$$C(x_{ij}) = \sum_i \sum_j x_{ij} \cdot k_n \cdot \delta_{зав} \cdot d_{ij}^{зав} + \sum_i \sum_j x_{ij} \cdot k_n \cdot \delta_{пор} \cdot d_{ij}^{пор} + \Delta D / \Delta x_{ij} \rightarrow \min. \quad (3.12)$$

де C – витрати на перевезення вантажу, грн.;

x_{ij} – змінна кількість вагонів, що переміщується від станції i до станції j ;

k_n – коефіцієнт, що враховує прогнознi значення обсягів перевезення вантажу;

$\delta_{зав}$, $\delta_{пор}$ – доля завантажених вагонів та порожніх вагонів відповідно що прямують від станції i до станції j ;

$d_{ij}^{зав}$, $d_{ij}^{пор}$ – витрати, що пов'язані із переміщенням завантажених та порожніх вагонів відповідно;

ΔD – питомі витрати у зв'язку зі збільшенням вагонопотоку вище середнього, грн.;

Δx_{ij} – питома збільшення кількості вагонів, що перевозиться від станції i до станції j .

У якості обмежень враховуються такі чинники:

- обмеження, що пов'язані із пропускнуою спроможністю станцій та діляниць

$$\sum N_{наяв}^{ст/ділянь} - \sum N_{потр}^{ст/ділянь} \geq \Pi; \quad (3.13)$$

- обмеження за довжиною складу вантажного поїзду

$$\sum_{e=1}^S \mu_e(e) \leq L_e; \quad (3.14)$$

- обмеження, що враховує строк доставки вантажу

$$t_{нав} + t_{форм} + t_{ш.прям} \leq T. \quad (3.15)$$

За умови надходження необхідної кількості вагонів до пунктів навантаження

$$1 \leq x_{ij} \leq \frac{a_i}{q_{ст}}, \quad (3.16)$$

де $\sum N_{нав}^{ст/дільн}$ – наявна пропускна спроможність станцій та дільниць відповідно у поїздах;

$\sum N_{потр}^{ст/дільн}$ – потрібна пропускна спроможність станцій та дільниць відповідно, що необхідна для виконання плану перевезень у поїздах;

Π – кількість поїздів, що можуть бути задіяні при розподілі вагонів за напрямками на залізничні мережі;

$\mu_e(e)$ – інтенсивність вагонопотоку на e -тій залізничній станції;

S – кількість станцій, на які заходить поїзд;

L_e – довжина приймально-відправних колій на e -тій станції;

$t_{нав}$ – час на навантаження x_{ij} вагонів, год;

$t_{форм}$ – тривалість формування поїзда, год;

$t_{ш.прям}$ – час знаходження поїзда на шляху прямування, год;

T – строк доставки вантажу, год;

a_i – кількість вантажу в i -тому пункті навантаження, т;

$q_{ст}$ – середнє статичне навантаження вагону, т/ваг.

У періоди масового навантаження сезонних вантажів може виникнути дефіцит у вагонах (зерновозах) та у пропускній спроможності станцій та дільниць. Таке становище веде до збільшення експлуатаційної роботи залізниць і, тим самим, приведе до фінансових втрат галузі.

Застосування на мережі залізниць результату рішення запропонованої моделі дає можливість диспетчеру (ДНЦ) приймати раціональні управлінські

рішення. Тобто планувати та оперативно виконувати розподілення вагонів конкретного типу у залежності від попиту на вантажні вагони по дільницям, що менш завантажені і мають більшу пропускну здатність [42]. Ця модель враховує як річні коливання обсягів перевезень, так і місячні. А також завантаженість транспортних засобів та залізничної інфраструктури. Така технологія дозволяє приймати рішення як довгострокові, так і оперативні, безпосередньо в системі організації вагонопотоків.

Прогнозні значення показників перевезення зерна та продуктів перемолю на найближчі 5 років наведено у таблиці 3.2.

Таблиця 3.2 – Прогнозні значення показників перевезення зерна та продуктів перемолю

Показник	Роки				
	2026 р.	2027 р.	2028 р.	2029 р.	2030 р.
Обсяг перевезення, млн. т	39,7	41,89	44,11	45,79	48,46
Динаміка зміни обсягів перевезення, %	5,43	5,52	5,31	3,8	5,84
Прогнозні обсяги відправлення в вагонах	610769	644461	678682	704461	745538

Завдяки використанню запропонованих методів прогнозування розраховано необхідну кількість вагонів конкретного типу відповідно до прогнозних обсягів перевезення певних вантажів, що наведено у Додатку А, та удосконалено процедуру визначення завантаженості залізничної інфраструктури.

Завдяки прогнозуванню обсягів перевезення на наступний період можна знайти оптимальну технологію перевезення вантажів на залізничних напрямках, яка адаптована до коливань обсягів навантаження і забезпечує мінімальні непродуктивні простої та зниження порожнього пробігу вагонів за рахунок своєчасного надання необхідної кількості рухомого складу.

На основі отриманих даних про обсяги перевезень і, тим самим, знаючи найбільш завантажені напрямки у визначений час можна управляти пропускною здатністю на розрахунковому залізничному полігоні [40].

Але знаючи лише обсяги вантажних перевезень, не можна говорити про раціональне управління вагонопотоками, так як на українській залізниці вантажні та пасажирські перевезення здійснюються на одних й тих самих лініях. Для визначення раціональної технології переміщення вагонопотоку в оперативному режимі слід наперед прогнозувати розміри руху вантажних та пасажирських поїздів на напрямках.

Для автоматизації прийняття управлінських рішень оперативним персоналом залізничного транспорту було проведено моделювання управління вагонопотоками. Моделювання проводилось на віртуальному полігоні залізниці. Задача моделювання полягала в тому, щоб побудувати раціональний маршрут слідування вагонопотоку на розрахунковому залізничному напрямку, враховуючи завантаженість інфраструктури.

Інфраструктура української залізниці характеризується розгалуженістю мережі та наявністю паралельних напрямків перевезення з різним рівнем завантаженості, по яким слідують поїздопотоки з пасажирами та вантажами. На залізничній мережі паралельні ходи використовуються для визначення раціональних параметрів пропуску вагонопотоків для зниження експлуатаційних витрат залізниці, підвищуючи пропускну здатність завантажених напрямків, і, скорочуючи непродуктивні простой рухомого складу. Оперативне планування поїзної роботи на залізничній мережі по альтернативному напрямку просування вагонопотоку забезпечує рівномірність завантаження станцій та ділянок на шляху прямування й ефективне використання інфраструктури залізничного транспорту. Для знаходження оптимального альтернативного напрямку переміщення вагонопотоку в оперативному режимі слід наперед прогнозувати розміри руху вантажних та пасажирських поїздів між напрямками з паралельними ходами за допомогою інформаційних технологій, заснованих на нейронних мережах [39].

Графічна інтерпретація впорядкованої множини варіантів переміщення вагонопотоків (рисунок 3.9) свідчить про наявність альтернативних маршрутів від станції навантаження до станції призначення та завантаженість цих станцій.

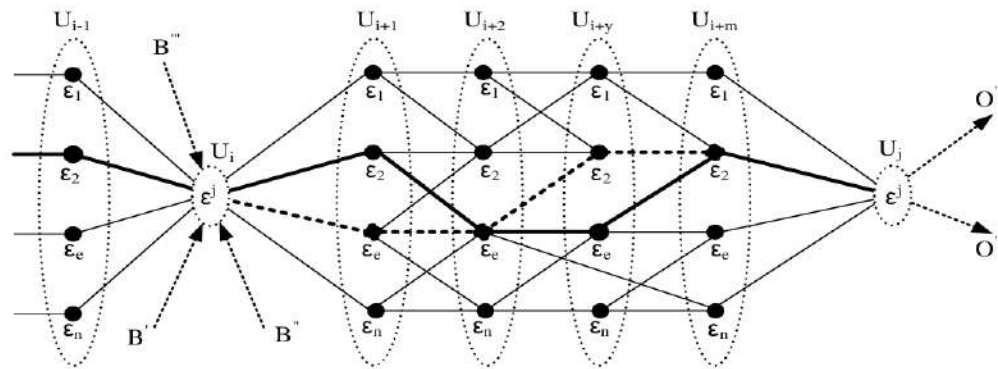


Рисунок 3.9 – Графічна інтерпретація упорядкованої множини варіантів переміщення вагонопотоків на напрямку

Система переміщення вагонопотоку може бути переведена із початкового стану до наступного за допомогою функції переходу S^k (послідовності оптимального керівництва на кожному k -му кроці). Функція переходу визначається оцінкою технічних, технологічних, експлуатаційних та економічних (витратних) показників

$$S^k \left\{ \varepsilon(i)^k, \varepsilon(i+1)^{k_{1,2,\dots,n}}, \varepsilon(i+2)^{k_{1,2,\dots,n}}, \dots, \varepsilon(i+m)^{k_{1,2,\dots,n}} \right\}. \quad (3.17)$$

При цьому, повинна виконуватись умова максимізації функції цілі $W(\varepsilon)$ – економії, отриманої в результаті реалізації оптимального плану переміщення вагонопотоку при оперативному плануванні, що може бути представлена у вигляді

$$W(\varepsilon) = \max \sum_{k=1}^n f_k(\varepsilon^{k-1}, S^k), \quad (3.18)$$

де n – кількість кроків системи;

ε – множина станцій на шляху переміщення вагону.

Функція цілі визначається послідовністю управлінських рішень на відповідному технологічному етапі просування вагонопотоку.

Масив технологічних операцій просування вагонопотоку від початкової до кінцевої станції на залізничному напрямку планування наведено у таблиці 3.3.

Таблиця 3.3 – Масив технологічних операцій просування вагонопотоку до кінцевої станції на залізничному напрямку планування

	U_{i-1}	U_i	U_{i+1}	U_{i+2}	U_{i+y}	U_{i+m}
1	0	0	$(i+1)^{\varepsilon_1}, (i+2)^{\varepsilon_1}$	$(i+2)^{\varepsilon_1}, (i+y)^{\varepsilon_1}$	$(i+y)^{\varepsilon_1}, (i+m)^{\varepsilon_1}$	0
2	$(i-1)^{\varepsilon_1}, i$	$i, (i+1)^{\varepsilon_1}$	$(i+1)^{\varepsilon_1}, (i+2)^{\varepsilon_2}$	$(i+2)^{\varepsilon_1}, (i+y)^{\varepsilon_2}$	$(i+y)^{\varepsilon_1}, (i+m)^{\varepsilon_2}$	$(i+m)^{\varepsilon_1}, j$
3	0	0	$(i+1)^{\varepsilon_2}, (i+2)^{\varepsilon_2}$	$(i+2)^{\varepsilon_2}, (i+y)^{\varepsilon_1}$	0	0
4	$(i-1)^{\varepsilon_2}, i$	0	$(i+1)^{\varepsilon_2}, (i+2)^{\varepsilon_e}$	$(i+2)^{\varepsilon_2}, (i+y)^{\varepsilon_2}$	$(i+y)^{\varepsilon_2}, (i+m)^{\varepsilon_2}$	$(i+m)^{\varepsilon_2}, j$
5	$(i-1)^{\varepsilon_e}, i$	$i, (i+1)^{\varepsilon_2}$	$(i+1)^{\varepsilon_e}, (i+2)^{\varepsilon_2}$	$(i+2)^{\varepsilon_e}, (i+y)^{\varepsilon_2}$	$(i+y)^{\varepsilon_e}, (i+m)^{\varepsilon_2}$	$(i+m)^{\varepsilon_e}, j$
6	0	$i, (i+1)^{\varepsilon_e}$	$(i+1)^{\varepsilon_e}, (i+2)^{\varepsilon_e}$	$(i+2)^{\varepsilon_e}, (i+y)^{\varepsilon_e}$	$(i+y)^{\varepsilon_e}, (i+m)^{\varepsilon_e}$	0
7	0	0	$(i+1)^{\varepsilon_e}, (i+2)^{\varepsilon_n}$	$(i+2)^{\varepsilon_e}, (i+m)^{\varepsilon_n}$	0	0
8	$(i-1)^{\varepsilon_n}, i$	$i, (i+1)^{\varepsilon_n}$	$(i+1)^{\varepsilon_n}, (i+2)^{\varepsilon_e}$	$(i+2)^{\varepsilon_n}, (i+y)^{\varepsilon_e}$	$(i+y)^{\varepsilon_n}, (i+m)^{\varepsilon_e}$	$(i+m)^{\varepsilon_n}, j$
9	0	0	$(i+1)^{\varepsilon_n}, (i+2)^{\varepsilon_n}$	$(i+2)^{\varepsilon_n}, (i+y)^{\varepsilon_n}$	$(i+y)^{\varepsilon_n}, (i+m)^{\varepsilon_n}$	0

Метод раціонального просування вагонопотоку на залізничному полігоні передбачає різні варіації формування вагонопотоків (маршрутні відправки, наскрізні, дільничні, збірні поїзди) у залежності від технологічних обмежень системи. Запропонована система дозволяє виконувати розрахунки для полігонів будь-яких розмірів і довільного часу планування. Для розрахунку вагонопотоків всього полігону залізниць потрібна кардинально нова автоматизована система управління вагонопотоками, що заснована на прогнозних даних обсягів перевезення.

Висновок. Особливо актуальною дана проблема є для України, оскільки значна частина залізничної мережі експлуатується протягом тривалого часу без масштабної модернізації. У результаті окремі напрямки характеризуються високим ступенем фізичного зносу та недостатньою пропускнуою спроможністю. Водночас зміни структури вантажних потоків та інтеграція до європейської транспортної системи потребують підвищення ефективності використання інфраструктурних ресурсів. На рівень завантаженості залізничної інфраструктури впливає значна кількість факторів технічного, організаційного та економічного характеру. Їхній комплексний вплив визначає ефективність використання транспортної мережі та рівень стабільності перевізного процесу.

4 Техніко-економічне обґрунтування впровадження додаткового програмного забезпечення для прогнозування даних до АСК ВП УЗ-Є

Доцільність впровадження додаткового програмного забезпечення прогнозування даних щодо обсягів перевезення вантажів, що інтегрується до Єдиної автоматизованої системи керування вантажними перевезеннями Укрзалізниці визначається показником економічного ефекту за розрахунковий період. Блок прогнозування на основі використання нейронної мережі може бути корисним для удосконалення визначення завантаженості залізничної інфраструктури, а також для розробки плану формування поїздів (ПФП), графіку руху поїздів (ГРП) та удосконалення автоматизованої системи «Місячне планування» (АС Месплан). Економічна ефективність впровадження системи оцінюється шляхом співставлення очікуваного ефекту та сукупних витрат на реалізацію проекту. Під сукупними витратами розуміють будь-які витрати, що пов'язані з реалізацією проекту [19]. У даному випадку в якості таких витрат виступають одноразові (капітальні) та поточні (експлуатаційні) витрати одночасно.

До складу одноразових витрат на здійснення інноваційного проекту відносяться витрати на розробку прикладного програмного забезпечення та його встановлення до АСК ВП УЗ – Є. До складу поточних витрат без урахування амортизаційних відрахувань відносяться: загальні витрати, що пов'язані з веденням до бази даних поточних показників вантажних перевезень; загальний річний фонд заробітної плати з відрахуванням на соціальне страхування; витрати на засоби зв'язку; витрати на електроенергію [43].

Вихідні дані для визначення економічного ефекту:

1. Вартість розробки прикладного програмного забезпечення та його встановлення до АСК ВП УЗ – Є складає 45000 грн.

2. Річна норма амортизаційних відрахувань на засоби обчислювальної техніки складає 25 %.

3. Дійсний фонд робочого часу ПЕОМ – 8760 маш.год.
4. Потужність однієї ПЕОМ – 0,35 кВт*год.
5. Вартість 1 кВт*год – 7,76 грн.
6. Середньомісячна заробітна плата інженера – програміста $r_m=20000$ грн.
7. Місячний фонд робочого часу інженера – програміста складає $t_m=168$ год.
8. Річна трудомісткість робіт при автоматизованій обробці інформації складає $K_m=8760$ маш.год.
9. Нарахування на соціальне страхування 22 %.
10. Розрахунковий період 5 років.
11. Річна ставка комерційних банків за депозитними внесками очікується в розмірі 13 % (0,13).
12. Очікується, що середній річний рівень інфляції не перевищує 9 % ($I=0,09$).
13. Розрахунковий рік 2027 – перший рік здійснення проєкту.
14. Місячні витрати на засоби зв'язку для певного напрямку $E_{зв}=2079$ грн.
15. Кількість електроенергії, що витрачається за годину роботи $P_{ел} = 20,42$ кВт.
16. Кількість годин використання електроенергії за рік $t_{ел} = 8760$ год.
17. Необхідна кількість диспетчерів Головного центру управління перевезеннями $K_d=8$.
18. Годинна тарифна ставка диспетчерського персоналу $r_r=82,48$ грн/год.
19. Середня кількість годин роботи диспетчера за рік $t_p=2112$ год.
20. Питомі витрати на 1 годину простою на станції магістрального локомотива з бригадою у вантажному русі $C_{тяг} = 1921,71$ грн.
21. Питомі витрати на 1 поїздо-годину простою на станції при електровозній тязі у вантажному русі $C_{ст} = 2079,29$ грн.
22. Питомі витрати на 1 поїздо-годину простою на перегоні при електровозній тязі у вантажному русі $C_{пер} = 2071,94$ грн.

Постійні експлуатаційні витрати при використанні запропонованої технології без урахування амортизаційних відрахувань на реновацію будемо визначати за формулою

$$И = З_{\text{д}} + З_{\text{прогр}} + B_{\text{зв}} + E_{\text{ел}}, \quad (4.1)$$

де $З_{\text{д}}$ – річні витрати на заробітну плату диспетчерського апарату, грн;

$З_{\text{прогр}}$ – річні витрати на заробітну плату інженера – програміста, грн;

$B_{\text{зв}}$ – витрати на засоби зв'язку за рік, грн;

$E_{\text{ел}}$ – річні витрати на електроенергію, грн.

Річні витрати на заробітну плату диспетчерського апарату залежать від

$$З_{\text{д}} = З_{\text{осн}} + З_{\text{дод}} + Н_{\text{зп}}, \quad (4.2)$$

де $З_{\text{осн}}$ – основна заробітна плата за рік роботи диспетчерського персоналу, грн;

$З_{\text{дод}}$ – додаткова заробітна плата за рік роботи, грн;

$Н_{\text{зп}}$ – нарахування на основну та додаткову заробітну плату в розрахунку на рік роботи, грн.

Основна заробітна плата диспетчерського персоналу за рік роботи визначається як

$$З_{\text{осн}} = r_{\text{г}} \cdot t_{\text{р}} \cdot K_{\text{д}}. \quad (4.3)$$

$$З_{\text{осн}} = 82,48 \cdot 2112 \cdot 8 = 1393582,08 \text{ грн.}$$

Додаткова заробітна плата за рік роботи становить 10% від основної заробітної плати та визначається як

$$З_{\text{дод}} = З_{\text{осн}} \cdot 0,10. \quad (4.4)$$

$$З_{\text{дод}} = 1393582,08 \cdot 0,10 = 139358,21 \text{ грн.}$$

Нарахування на основну та додаткову заробітну плату в розрахунку на рік роботи (на соціальне страхування) складають 22 % від їх суми, тобто

$$Н_{\text{зп}} = 0,22 \cdot (З_{\text{осн}} + З_{\text{дод}}). \quad (4.5)$$

$$Н_{\text{зп}} = 0,22 \cdot (1393582,08 + 139358,21) = 337246,86 \text{ грн.}$$

$$З_{\text{д}} = 1393582,08 + 139358,21 + 337246,86 = 1870187,15 \text{ грн.}$$

Річні витрати на заробітну плату інженера – програміста залежать від

$$З_{\text{прогр}} = З_{\text{осн}} + Н_{\text{зп}}, \quad (4.6)$$

При цьому, основна заробітна плата інженера – програміста за рік роботи визначається як

$$З_{\text{осн}} = \frac{r_{\text{м}} \cdot K_{\text{м}}}{t_{\text{м}}}, \quad (4.7)$$

$$З_{\text{осн}} = \frac{20000 \cdot 8760}{168} = 1042857,14 \text{ грн.}$$

Як зазначалось раніше, витрати на соціальне страхування складають 22 % від їх основної заробітної плати, тобто

$$Н_{\text{зп}} = 0,22 \cdot З_{\text{осн}}. \quad (4.8)$$

Тобто,

$$H_{\text{зп}} = 0,22 \cdot 1042857,14 = 229428,57 \text{ грн.}$$

Тоді загальні витрати на заробітну плату інженера – програміста складатимуть

$$З_{\text{прогр}} = 1042857,14 + 229428,57 = 1272285,71 \text{ грн.}$$

Витрати на засоби зв'язку будемо визначати за формулою

$$B_{\text{зв}} = 12 \cdot E_{\text{зв}}, \quad (4.9)$$

$$B_{\text{зв}} = 12 \cdot 2079 = 24948 \text{ грн.}$$

Витрати на електроенергію визначаємо за формулою

$$E_{\text{ел}} = P_{\text{ел}} \cdot r_{\text{ел}} \cdot t_{\text{ел}}. \quad (4.10)$$

$$E_{\text{ел}} = 7,76 \cdot 8760 \cdot 20,42 = 1388102,59 \text{ грн.}$$

Економічний ефект від впровадження процедури визначення завантаженості залізничної інфраструктури на основі прогнозних даних щодо обсягів перевезення визначається згідно з умовами використання за розрахунковий період. Сукупний економічний ефект визначається як сума річних економічних ефектів за розрахунковий період з обов'язковим урахуванням фактору часу (дисконтуванням або компаундуванням грошових потоків) за формулою [19]

$$E_t = \sum_{t=t_n}^{t_k} (3_{t1} - 3_{t2}) \cdot \alpha_t, \quad (4.11)$$

де Z_{t1} – вартісна оцінка витрат до впровадження заходу в t -му році розрахункового періоду, грн;

Z_{t2} – вартісна оцінка витрат усіх ресурсів у t -му році розрахункового періоду, грн;

α_t – коефіцієнт приведення результатів, витрат, економічного ефекту різних років до розрахункового періоду;

t_n – початковий рік розрахункового періоду;

t_k – кінцевий рік розрахункового періоду.

Вартісна оцінка витрат усіх ресурсів у t -му році розрахункового періоду визначається як сума одноразових інвестиційних витрат (витрати на науково-дослідні та проєктно-конструкторські роботи, витрати на розробку програмного забезпечення, капітальні витрати на технічне оснащення робочих місць диспетчерів), постійних поточних експлуатаційних витрат на здійснення діяльності, а також витрат, що залежать від загального річного фонду заробітної плати диспетчерського персоналу та інженера – програміста з урахуванням витрат на соціальне страхування, витрат на електроенергію та засоби зв'язку, приведених до розрахункового року у вигляді

$$Z_t = \sum_{t_n}^{t_k} (Z_d + Z_{\text{прогр}} + E_{\text{ел}} + B_{\text{зв}}) \cdot \alpha_t. \quad (4.12)$$

До складу одноразових витрат на впровадження процедури визначення завантаженості залізничної інфраструктури входять витрати:

- на удосконалення АСК ВП УЗ – Є у вигляді додаткового блоку прогнозування обсягів перевезення вантажів, що дозволяє диспетчерам Головного центру управління перевезеннями визначати більш точно прогнозні значення завантаженості залізничної інфраструктури на основі впровадження сформованої нейронної моделі до АРМ диспетчерського персоналу;

- на розробку, придбання, установку програмного забезпечення та налагодження сучасного ПЕОМ для диспетчерів.

Необхідність приведення результатів і витрат (їх різниці – економічного ефекту) різних років до розрахункового року пояснюється тим, що номінальна однакова сума грошей, що отримана в різні роки, має різну вартість. Виходячи з цього, економічний ефект у вигляді прибутку, отриманий в році t розрахункового періоду, потрапляє в наступні роки в господарський оборот і приносить похідний (вторинний) економічний ефект [19].

Результати економічного ефекту й витрати різних років будемо приводити до першого року життєвого циклу проекту, тобто визначаємо в теперішній вартості грошей (дисконтування). Тоді, коефіцієнт приведення α_t визначимо за формулою

$$\alpha_t = \frac{1}{[(1+E_n)(1+I+R)]^{t-t_p}}, \quad (4.13)$$

де R – ставка, що враховує ступінь ризику здійснення проекту в частках одиниці. R приймаємо рівним 0,01, що відбиває низький ступінь ризику;

t – порядковий номер року t життєвого циклу проекту, що приводиться до розрахункового (останнього) року;

t_p – порядковий номер останнього року розрахункового періоду.

Коефіцієнт приведення за різними роками інноваційного проекту дорівнює:

$$\begin{aligned} \alpha_{2027} &= \frac{1}{[(1 + 0,13)(1 + 0,09 + 0,01)]^0} = 1; \\ \alpha_{2028} &= \frac{1}{[(1 + 0,13)(1 + 0,09 + 0,01)]^1} = 0,80; \\ \alpha_{2029} &= \frac{1}{[(1 + 0,13)(1 + 0,09 + 0,01)]^2} = 0,73; \\ \alpha_{2030} &= \frac{1}{[(1 + 0,13)(1 + 0,09 + 0,01)]^3} = 0,52; \\ \alpha_{2031} &= \frac{1}{[(1 + 0,13)(1 + 0,09 + 0,01)]^4} = 0,42. \end{aligned}$$

Витрати, що пов'язані з простоєм поїздів на станціях відправлення в очікуванні вільної нитки графіку будемо визначати за формулою

$$З_{ст} = t_{ст}(C_{ст} + C_{тяг}), \quad (4.14)$$

де $t_{ст}$ – загально річний час простою поїздів на станціях відправлення, год. За існуючою технологією цей час дорівнює 1,16 годин, а при удосконаленій технології після впровадження прогностного блоку до АСК ВП УЗ – Є він знижується до 0,37 год.

Статистичні дані кількості затримок поїздів на станціях відправлення за попередні роки складають:

- 2021 р. – 106 поїздів;
- 2022 р. – 108 поїздів;
- 2023 р. – 112 поїздів;
- 2024 р. – 110 поїздів;
- 2025 р. – 115 поїздів.

Визначимо середньорічний темп росту кількості поїздів за добу за 2021 – 2025 роки

$$\bar{T} = \sqrt[n-1]{\frac{y_n}{y_1}}, \quad (4.15)$$

де n – число значень фактичного часового ряду;

y_n – кінцеве значення фактичного ряду;

y_1 – базове значення фактичного ряду (в більшості випадків – перше значення).

$$\bar{T} = \sqrt[4-1]{\frac{115}{106}} = \sqrt[3]{1,08} = 1,026.$$

За допомогою цього методу можна визначити прогностні значення затриманих поїздів на станції

$$\hat{y}_{n+t} = y \cdot \bar{T}^t, \quad (4.16)$$

де t – кількість інтервалів фактичного ряду.

Таким чином, були отримані прогностні значення середньорічних обсягів затримки поїздів на станції відправлення у розрахунковому періоді:

$$\begin{aligned} \hat{y}_{2027} &= 115 \cdot 1,026^1 = 118 \text{ поїздів;} \\ \hat{y}_{2028} &= 115 \cdot 1,026^2 = 121 \text{ поїздів;} \\ \hat{y}_{2029} &= 115 \cdot 1,026^3 = 124 \text{ поїздів;} \\ \hat{y}_{2030} &= 115 \cdot 1,026^4 = 127 \text{ поїздів;} \\ \hat{y}_{2031} &= 115 \cdot 1,026^5 = 131 \text{ поїздів.} \end{aligned}$$

Витрати, що пов'язані з простоєм поїздів на перегонах будемо визначати за формулою

$$З_{\Pi} = t_{\Pi} (C_{\text{пер}} + C_{\text{тяг}}), \quad (4.17)$$

де t_{Π} – загально річний час простою поїздів на перегонах, який за існуючою технологією дорівнює 4,14 годин, а при удосконаленій технології після впровадження прогностного блоку до АСК ВП УЗ – Є він знижується до 0,52 год.

Статистичні дані кількості затримок поїздів на перегонах за попередні роки складають:

- 2021 р. – 1406 поїздів;
- 2022 р. – 1437 поїздів;
- 2023 р. – 1452 поїздів;
- 2024 р. – 1413 поїздів;
- 2025 р. – 1483 поїздів.

Визначимо середньорічний темп росту кількості затриманих поїздів на перегонах за 2021 – 2025 роки

$$\bar{T} = \sqrt[4-1]{\frac{1483}{1406}} = \sqrt[3]{1,055} = 1,018.$$

Прогнозні значення середньорічної кількості затриманих поїздів на перегоні у розрахунковому періоді:

$$\begin{aligned}\hat{y}_{2027} &= 1483 \cdot 1,018^1 = 1510 \text{ поїздів;} \\ \hat{y}_{2028} &= 1483 \cdot 1,018^2 = 1537 \text{ поїздів;} \\ \hat{y}_{2029} &= 1483 \cdot 1,018^3 = 1565 \text{ поїздів;} \\ \hat{y}_{2030} &= 1483 \cdot 1,018^4 = 1593 \text{ поїздів;} \\ \hat{y}_{2031} &= 1483 \cdot 1,018^5 = 1621 \text{ поїздів.}\end{aligned}$$

Розрахунок приросту економічного ефекту, що отримує залізничний транспорт завдяки впровадженню прогнозного блоку обсягів перевезення на основі нейронної мережі, наведено в таблиці 4.1.

Сумарний приріст економічного ефекту з урахуванням приведення грошових потоків до першого року розрахункового періоду складає 33889,59 тис. грн. Строк окупності одночасних витрат настає з першого року впровадження блоку прогнозування до АСК ВП УЗ – Є.

Таблиця 4.1 – Розрахунок економічного ефекту від впровадження нейронної моделі прогнозування обсягів перевезення вантажів до АСК ВП УЗ – Є

Показник	Роки розрахункового періоду				
	2027	2028	2029	2030	2031
1	2	3	4	5	6
Витрати при існуючій технології					
1 Річна кількість затриманих поїздів на станції відправлення	118	121	124	127	131
2 Середній час простою поїздів у зв'язку із затримкою на станції відправлення, год	1,16	1,16	1,16	1,16	1,16
3 Понаднормовий час простою поїздів на станції за рік, год	136,88	140,36	143,84	147,32	151,96
4 Загальні річні витрати на понаднормовий простій поїздів на станції відправлення, тис. грн	547,66	561,68	575,50	589,43	607,99
5 Річна кількість затриманих поїздів на перегоні	1510	1537	1565	1593	1621
6 Середній час простою поїздів у зв'язку із затримкою на перегоні, год	4,14	4,14	4,14	4,14	4,14
7 Понаднормовий час простою поїздів на перегоні за рік, год	6251,4	6363,18	6479,10	6595,02	6710,94
8 Загальні річні витрати на простій поїздів на перегонах, тис. грн	24965,9	25412,31	25875,26	26338,2	26801,15

Продовження таблиці 4.1

1	2	3	4	5	6
9 Загальні витрати на простій поїздів, тис. грн	25513,56	25973,99	26450,76	26927,63	27409,14
10 Сумарні витрати з урахуванням приведення до розрахункового року, тис. грн	25513,56	20779,19	19309,05	14002,37	11511,84
Витрати при впровадженні блоку прогнозування завантаженості інфраструктури					
1 Одноразові витрати (вартість розробки прикладного програмного забезпечення та його встановлення до АСК ВП УЗ – Є), тис. грн	45				
2 Поточні витрати, тис. грн:	4555,52	4555,52	4555,52	4555,52	4555,52
3 Загально річний час простою поїздів на станції відправлення після впровадження блоку прогнозування	0,37	0,37	0,37	0,37	0,37
4 Річний простій поїздів на станції відправлення після впровадження, год.	43,66	44,77	45,88	46,99	48,47
5 Загальні річні витрати на простій поїздів на станції відправлення після впровадження, тис. грн	175,63	180,09	184,56	189,02	194,98
6 Загально річний час простою поїздів на перегонах після впровадження блоку прогнозування	0,52	0,52	0,52	0,52	0,52

Продовження таблиці 4.1

1	2	3	4	5	6
7 Річний простій поїздів на перегонах після впровадження, год.	785,2	799,24	813,80	828,36	842,92
8 Загальні річні витрати на простій поїздів на перегонах після впровадження, тис. грн	11279,08	11480,76	11689,91	11899,06	12108,21
9 Сумарні витрати при прогнозуванні обсягів перевезення, тис. грн	16010,23	16858,71	16429,99	16643,6	16858,71
10 Сумарні витрати після впровадження з урахуванням приведення до першого року, тис. грн	16010,23	13486,97	11993,89	8654,67	7080,66
11 Коефіцієнт приведення витрат різних років	1	0,80	0,73	0,52	0,42
12 Економічний ефект з урахуванням приведення, тис. грн	9503,33	7292,22	7315,16	5347,7	4431,18
13 Економічний ефект з наростаючим підсумком, тис. грн	9503,33	16795,55	24110,71	29458,41	33889,59

Висновки

Завдяки прогнозуванню обсягів перевезення на наступний період в роботі вдалося знайти оптимальну технологію перевезення вантажів із визначення завантаженості залізничної інфраструктури. Під оптимальною технологією організації вагонопотоків розуміється вибір маршруту прямування поїзда по найкоротшій відстані без затримок і з мінімальними експлуатаційними витратами на перевезення вантажу.

1. В роботі проведено аналіз часових рядів, який допоміг визначити природу ряду для різних видів вантажу. Виявлено нестационарність системи. В структурі часового ряду обсягів перевезення зерна та продуктів перемолу чітко прослідковується сезонна компонента. Коефіцієнт нерівномірності склав 1,7. Для будівельних вантажів нерівномірність майже відсутня. Коефіцієнт нерівномірності для цього випадку склав 1,1. Тому, при розрахунку плану перевезення вантажів та оперативному управлінні вагонопотоками слід враховувати нерівномірність перевезення кожного вантажу.

2. З урахуванням особливостей вхідної інформації сформовано нейромережеву модель прогнозування обсягів перевезення. Даний спосіб прогнозування володіє високими властивостями адаптації до змінних вхідних даних за рахунок самонавчання. Величина точності прогнозування перевезень визначена через значення MAPE, яка склала 5,56 %. Враховуючи, що залізничний транспорт є досить інертною системою, такий показник є достатнім для прийняття управлінських рішень.

3. Формалізовано технологію організації вагонопотоків. Для знаходження раціонального варіанту переміщення вагонів запропоновано враховувати параметр нерівномірності перевезень або сезонність. За оптимальність приймаємо мінімізацію експлуатаційних витрат на перевезення вантажу. На основі отриманих даних про обсяги перевезень і використовуючи оптимізаційну модель було отримано рішення задачі оптимального плану розподілу вагонів на розрахунковому залізничному полігоні. Процедура розподілу вагонів є достатньо

універсальна та дозволяє в реальному масштабі часу корегувати план формування поїздів. Запропонована модель може бути інтегрована до автоматизованого робочого місця диспетчера, що має додатковий блок прогнозування обсягів перевезення вантажів для прийняття раціональних управлінських рішень, і підключене до АСК ВП УЗ – Є .

4. Завдяки впровадженню прогнозного блоку обсягів перевезення до АСК ВП УЗ – Є на основі нейронної мережі сумарний приріст економічного ефекту з урахуванням приведення грошових потоків до першого року розрахункового періоду склав 33889,59 тис. грн. Строк окупності одночасних витрат настає з першого року впровадження блоку прогнозування до АСК ВП УЗ – Є.

Список використаних джерел

- 1 Залізничні перевезення 2025: основні тренди. Центр транспортних стратегій, 2026. URL: https://cfts.org.ua/infographics/zaliznichni_perevezennya_2025_osnovni_trendi.
- 2 Держстат. Київ, 2026. URL: <https://stat.gov.ua/>.
- 3 Вантажні перевезення. URL: http://www.ukrstat.gov.ua/operativ/operativ2016/tr/vp/vp_u/vp1216_u.htm.
- 4 Офіційний сайт АТ «Укрзалізниця». Київ, 2012. URL: http://www.uz.gov.ua/cargo_transportation/general_information/indicators_of_transi.
- 5 Продащук С. М., Богомазова Г.Є. Нова концепція тарифної політики для внутрішніх залізничних вантажних перевезень. *Зб. наук. праць Українського державного університету залізничного транспорту*. 2016. Вип. 164. С. 160–168.
- 6 Чучуева И. А. Прогнозирование временных рядов при помощи модели экстраполяции по выборке максимального подобия. *Наука и современность*. 2010. Вып. № 1–2. С. 187–192.
- 7 Pradhan R., Kumar R. Forecasting Exchange Rate in India: An Application of Artificial Neural Network Model. *Journal of Mathematics Research*. 2010. Vol. 2, No. 4. P. 111–117.
- 8 Панченко С. В., Бутько Т. В., Прохорченко А. В., Пархоменко Л. А. Формирование автоматизированной системы расчета пропускной способности железнодорожных сетей для продвижения грузопотоков предприятий горно-металлургического комплекса. *Науковий вісник Національного гірничого університету*. 2016. № 2. С. 93–99.
- 9 Копитко В. І., Дацків Ю. О. Прогнозування обсягів вантажних перевезень залізниць в регіонах. *Науковий вісник НЛТУ України: зб. наук.-тех. пр.* 2011. Вип. 21.10. С. 139–144.
- 10 Gheyas I. A, Smith L. Neural Network Approach to Time – Series Forecasting. *Proceedings of the World Congress on Engineering*. 2009. Vol. II, July 1-3. P. 1292–1296.

11 Wang Y., Sun H., Zhu J., Zhu B. Optimization Model and Algorithm Design for Airline Fleet Planning in a Multi-airline Competitive Environment. *Mathematical Problems in Engineering*. 2015. Vol. 2015. P. 1–13.

12 Najaf P., Famili S. Application of an Intelligent Fuzzy Regression Algorithm in Road Freight Transportation Modelling. *Promet – Traffic & Transportation*. 2013. Vol. 25, No. 4. P. 311–322.

13 Morariu N., Iancu E., Vlad E. S. A Neural Network Model For Time – Series Forecasting. *Romanian Journal of Economic Forecasting*. 2009. No. 4. P. 213–223.

14 Panchenko S., Lavrukhin O., Shapatina O. Creating a qualimetric criterion for the generalized level of vehicle. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2017. Vol. 1, Issue 3 (85). P. 39–45.

15 Butko T., Prokhorov V., Chekhunov D. Devising a method for the automated calculation of train formation plan by employing genetic algorithms. *European Journal of Enterprise Technologies*. 2017. Vol. 1, Issue 3 (85). P. 55–61.

16 Xie Mei-Quan, Xia-Miao Li, Wen-Liang Zhou, Yan-Bing Fu. Forecasting the Short-Term Passenger Flow on High-Speed Railway with Neural Networks. *Computational Intelligence and Neuroscience*. 2014. Vol. 2014. P. 1–8.

17 Tortum A., Yayla N., Gokdag M. The Modelling of Mode Choices of Intercity Freight Transportation with the Artificial Neural Networks and Adaptive Neuro-Fuzzy Inference System. *Expert Systems with Applications: An International Journal*. 2009. Vol. 36, Issue 3, April. P. 6199–6217.

18 Draper N., Smith H. Applied regression analysis: third edition. New York, 1998. 736 p.

19 Балака Є.І., Зоріна О.І., Колесникова Н.М., Писаревський І.М. Оцінка економічної доцільності інвестицій в інноваційні проекти на транспорті: навч. посібник. Харків: УкрДАЗТ, 2005. 210 с.

20 Лаврухін О.В., Богомазова Г.Є. Підвищення функціонування залізничних вантажних перевезень. *Modern methods, innovations, and experience of practical application in the field of technical sciences: international research and practice conference*. (Radom, Republic of Poland, 27–28 december, 2017). Radom: Isdevnieciba «Baltija Publishing», 2017. P. 152–155.

- 21 Rose C., Smith M. D. The Multivariate Normal Distribution. *Mathematica Journal*. 1996. № 6. P. 32–37.
- 22 Halmos, Paul R. *Measure Theory*. Berlin, New York: Springer-Verlag, 1974. ISBN 978-0-387-90088-9.
- 23 Taylor S. J. *Introduction to measure and integration*. Cambridge University Press, 1973. ISBN 9780521098045.
- 24 Камінська Н.І. Адаптивні методи у соціально-економічному прогнозуванні. *Форум молодих економістів-кібернетиків «Моделювання економіки: проблеми, тенденції, досвід»*: VII Міжнар. наук.-метод. конф. (Тернопіль, 21–22 жовтня 2016 р.). Тернопіль, 2016. С. 83–84.
- 25 Mazengia, D.H. *Forecasting spot electricity market prices using time series models: thesis for the degree of master of science in electric power engineering*. Gothenburg, Chalmers University of Technology, 2008. 89 p.
- 26 Копитко В.І., Дацків Ю.О. Прогнозування обсягів вантажних перевезень залізниць в регіонах. *Збірник науково-технічних праць «Науковий вісник НЛТУ України»*. 2011. Вип. 21.10. С. 139–144.
- 27 Gheyas I., Smith L. A neural network approach to time – series forecasting. *Proceedings of the World Congress on Engineering*. 2009. Vol. II, July 1-3. P. 1292–1296.
- 28 Wang Y., Sun H., Zhu J., Zhu B. Optimization model and algorithm design for airline fleet planning in a multi-airline competitive environment. *Mathematical Problems in Engineering*. 2015. Vol. 2015. P. 1–13.
- 29 Najaf P., Famili S. Application of an intelligent fuzzy regression algorithm in road freight transportation modelling. *Promet – Traffic & Transportation*. 2013. Vol. 25, No. 4. P. 311–322.
- 30 Morariu N., Iancu E., Vlad S. A neural network model for time – series forecasting. *Romanian Journal of Economic Forecasting*. 2009. No. 4. P. 213–223.
- 31 Богомазова Г.Є. Формування автоматизованої технології управління вагонопотоками на залізничних напрямках. дис. ... кандидата техн. наук: 05.22.01. Харків, 2019. 204 с.

32 Pradhan R., Kumar R. Forecasting exchange rate in india: an application of artificial neural network model. *Journal of Mathematics Research*. 2010. Vol. 2, No. 4. P. 111–117.

33 Panchenko S., Lavrukhin O., Shapatina O. Creating a qualimetric criterion for the generalized level of vehicle. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2017. Vol. 1, Issue 3 (85). P. 39–45.

34 Xie Mei-Quan, Li Xia-Miao, Zhou Wen-Liang, Fu Yan-Bing. Forecasting the short – term passenger flow on high-speed railway with neural networks. *Computational Intelligence and Neuroscience*. 2014. Vol. 2014. P. 1–8.

35 Tortum A., Yayla N., Gokdag M. The modelling of mode choices of intercity freight transportation with the artificial neural networks and adaptive neuro-fuzzy inference system. *Expert Systems with Applications: An International Journal*. 2009. Vol. 36, Issue 3, April. P. 6199–6217.

36 Нагорний Є.В., Наумов В.С., Черпаха О.С. Нейромережева модель прогнозування параметрів вантажопотоку у містах. *Вісник східноукраїнського національного університету імені Володимира Даля*. 2015. № 2 (219). С. 126–130.

37 Malada H. R., Ivakhnenko A. G. Inductive Learning Algorithms for Complex Systems Modeling. Florida, 1994. 368 p.

38 Butko T., Prodashchuk S., Bogomazova G., Shelekhan G., Prodashchuk M., Purii R. Improvement of technology for management of freight rolling stock on railway transport. *Eastern-European journal of enterprise technologies*. 2017. Vol. 3, № 3 (87). P. 4–11. DOI: 10.15587/1729-4061.2017.99185.

39 Зеленський В., Газук А, Богомазова Г. Удосконалення технології транспортування експортних вантажів залізницею. *84 студентська науково-технічна конференції УкрДУЗТ: тези доповідей*. (Харків, 11 – 12 грудня, 2024 р.). Харків: УкрДУЗТ, 2024 р. С. 252. URL: <https://kart.edu.ua/nauka/stud-ndr/stud-ntk>.

40 Богомазова Г.Є., Мигалатій Є.А., Зеленський В.В. Підвищення ефективності роботи залізничної станції шляхом раціонального розподілу вантажних ресурсів. *Інтелектуальні транспортні технології: 5-а міжнародна*

науково-технічна конференція (Харків, 25-27 листопада 2024 р.). Харків: УкрДУЗТ, 2024. С. 151 – 152.

41 Богомазова Г.Є., Чехунов Д.М., Фесенко В.А. Підвищення ефективності функціонування регіональної філії в умовах незбереженості вантажів. *Інтелектуальні транспортні технології: 6-а міжнародна науково-технічна конференція* (Харків, 24-26 листопада 2025 р.). Харків: УкрДУЗТ, 2025. С. 152 – 153.

42 Фесенко В., Богомазова Г. Удосконалення системи управління ризиками на підприємствах залізничного транспорту. *85 студентська науково-технічна конференції УкрДУЗТ: тези доповідей.* (Харків, 10 – 11 грудня, 2025 р.). Харків: УкрДУЗТ, 2025 р. С. 334-335. URL: <https://kart.edu.ua/nauka/stud-ndr/stud-ntk>.

43 Фесенко В., Балака Є.І. Автоматизація організаційно-управлінських процесів як основний резерв зменшення витрат на залізничні перевезення. *85 студентська науково-технічна конференції УкрДУЗТ: тези доповідей.* (Харків, 10 – 11 грудня, 2025 р.). Харків: УкрДУЗТ, 2025 р. С. 423-424. URL: <https://kart.edu.ua/nauka/stud-ndr/stud-ntk>.

Додаток А

Розрахунок необхідного парку рухомого складу з урахуванням прогнозних обсягів перевезень вантажів

Таблиця А.1 – Розрахунок необхідної кількості зерновозів (ЗРВ) при різних показниках обігу вагонів на основі прогнозних даних обсягів перевезення зерна та продуктів перелому

Показник	Місяці року												Середньо місячний показник
	Січ.	Лют.	Бер.	Квіт.	Трав.	Черв.	Лип.	Серп.	Верес.	Жовт.	Лист.	Груд.	
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
Прогноз обсягів перевезення зерна та продуктів перемолу, млн. т	3,1	3,4	3,6	3,4	2,9	2,2	2,4	4,0	3,9	3,8	3,6	3,4	39,7*
Прогноз необхідної кількості ЗРВ в середньому за добу	1427	1600	1715	1600	1312	909	1024	1946	1888	1830	1715	1600	1548
Розрахунковий робочий парк ЗРВ при обігу вагона 11,3 діб	16126	18080	19380	18080	14826	10272	11572	21990	21335	20679	19380	18080	17493

Продовження таблиці А.1

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
Розрахунковий робочий парк ЗРВ при обігу вагона 13,2 діб	18837	21120	22638	21120	17319	11999	13517	25688	24922	24156	22638	21120	20434
Розрахунковий робочий парк ЗРВ при обігу вагона 16,9 діб	24117	27040	28984	27040	22173	15363	17306	32888	31908	30927	28984	27040	26162
Наявний середньодобовий робочий парк вагонів	19810	19810	19810	19810	19810	19810	19810	19810	19810	19810	19810	19810	19810
Дефіцит/профіцит вагонів при обігу ЗРВ 11,3 діб	+3684	+1730	+430	+1730	+4984	+9538	+8238	-2180	-1525	-869	+430	+1730	+2317
Дефіцит/профіцит вагонів при обігу ЗРВ 13,2 доби	+973	-1310	-2828	-1310	+2491	+7811	+6293	-5878	-5112	-4346	-2828	-1310	-624
Дефіцит/профіцит вагонів при обігу ЗРВ 16,9 діб	-4307	-7230	-9174	-7230	-2363	+4447	+2504	-13078	-12098	-11117	-9174	-7230	-6352

Найменший показник обігу ЗРВ складає 11,3 доби, найбільший показник складає 16,9 діб. Найчастіше обіг ЗРВ складає 13,2 доби. При цьому, обіг ЗРВ, що належать залізниці, та власних ЗРВ несуттєво відрізняються один від одного.

АКТ

перевірки кваліфікаційної роботи магістра на наявність ознак академічного
плагіату

Відповідно до даних сервісу Strikeplagiarism.com кваліфікаційна робота
«Розробка моделі прогнозування обсягів вантажних перевезень для
оцінювання рівня завантаженості залізничної інфраструктури», автор –
ФЕСЕНКО Віталій Анатолійович, містить 1,21 % текстових збігів.

Ознаки академічного плагіату – відсутні.

Перевірку виконала:

доцент кафедри управління

вантажною і комерційною роботою _____  Ганна БАУЛІНА

01.06.2026 р.