

Український державний університет залізничного транспорту

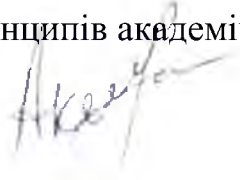
Кафедра управління експлуатаційною роботою

УДОСКОНАЛЕННЯ СХЕМ ПЕРЕВЕЗЕНЬ ЗЕРНОВИХ ВАНТАЖІВ НА
ОСНОВІ ТЕОРЕТИКО-ІГРОВОГО ПІДХОДУ

Пояснювальна записка та розрахунки
до кваліфікаційної роботи

УСПЗВ.300.00.00.000 ПЗ

Розробив студент групи 221 –ОПУТ –Д23
спеціальності 275/275.02 – Транспортні
технології (на залізничному транспорті)
(роботу виконано самостійно, відповідно до
принципів академічної доброчесності)



Еміль АКОПЯН

Керівник: професор, докт. техн. наук
Андрій ПРОХОРЧЕНКО

Рецензент: професор, канд. техн. наук
Віктор ЗАПАРА

2025

АНОТАЦІЯ

Дана кваліфікаційна робота включає в себе 14 слайдів презентації, 71 аркуш пояснювальної записки формату А4, що включає 19 рисунків, 19 літературних джерел.

Ключові слова: СХЕМА ПЕРЕВЕЗЕНЬ, ЗЕРНОВІ ВАНТАЖІ, ТЕОРЕТИКО-ІГРОВИЙ ПІДХІД

Об'єктом дослідження є процес вантажних перевезень в міжнародному сполученні

Метою дослідження є підвищення ефективності вантажних міжнародних перевезень на залізничному транспорті України на основі удосконалення схем перевезень зернових вантажів з використанням теоретико-ігрового підходу. Це дозволить підвищити ефективність планування перевезень і, як наслідок, зменшити витрати та врахувати логістичні особливості.

В межах даної кваліфікаційної роботи удосконалено процедуру вибору схеми перевезень зернових вантажів з використанням теоретико-ігрового підходу. Вперше:

- удосконалено процедуру вибору схеми перевезень зернових вантажів на основі математичної моделі “гри з природою” з перетворення її до задачі лінійного програмування, що, на відміну від існуючих, дозволяє врахувати стратегії використання різних комбінацій маршрутів на залізничному та автомобільному транспорті, сценарії ризиків затримки при русі коридором ТЕН-Т при заданих вхідних параметрах та обмеженнях.

- доопрацьовано склад функціональних задач інформаційно-керуючої системи залізничного транспорту, які є основою для формування системи підтримки прийняття рішень працівників пов'язаних з вибором схем перевезень зернових вантажів та пошуку залізничних маршрутів руху через Трансевропейську мережу ТЕН-Т в межах локальної комп'ютерної мережі, яка інтегрована до системи АСК ВП УЗ-Є та PCS (Path Coordination System).

ABSTRACT

This qualification work includes 14 presentation slides, 71 sheets of explanatory note in A4 format, including 19 drawings, 19 literary sources.

Keywords: TRANSPORTATION SCHEME, GRAIN CARGO, GAME THEORETICAL APPROACH

The object of the study is the process of freight transportation in international traffic

The purpose of the study is to increase the efficiency of international freight transportation on the railway transport of Ukraine based on improving grain cargo transportation schemes using a game theoretical approach. This will increase the efficiency of transportation planning and, as a result, reduce costs and take into account logistical features.

Within the framework of this qualification work, the procedure for selecting a grain cargo transportation scheme using a game theoretical approach has been improved. For the first time:

- the procedure for selecting a grain cargo transportation scheme has been improved based on the mathematical model of the “game with nature” by transforming it into a linear programming problem, which, unlike existing ones, allows taking into account strategies for using different combinations of routes on rail and road transport, scenarios of delay risks when moving along the TEN-T corridor with given input parameters and restrictions.

- the composition of functional tasks of the information and control system of railway transport has been finalized, which are the basis for forming a decision support system for employees related to the selection of grain cargo transportation schemes and the search for railway routes through the Trans-European Network TEN-T within the local computer network, which is integrated into the ASK VP UZ-E system and PCS (Path Coordination System).

Український державний університет залізничного транспорту

Факультет управління процесами перевезень

Кафедра управління експлуатаційною роботою

Освітній рівень: магістр

Спеціальність 275 Транспортні технології

275.02 Транспортні технології (на залізничному транспорті)

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри,

профе _____ наук

ько Т.В.

« 19 » березня 2025 р.

ЗАВДАННЯ НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ

Акопяну Емілю Леоновичу

1 Тема роботи «Удосконалення схем перевезень зернових вантажів на основі теоретико-ігрового підходу» керівник Прохорченко Андрій Володимирович, професор, доктор техн. наук затверджена розпорядженням по факультету управління процесами перевезень від від «24» лютого 2025 р. № 04/25.

2 Строк подання студентом роботи 15 червня 2025 року.

3 Вихідні дані до роботи: Техніко-експлуатаційні показники роботи залізничного транспорту України, Литви, Латвії та Естонії, нормативна документація щодо функціонування Транс'європейської транспортної мережі та North Sea–Baltic Corridor.

4 Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити) Вступ. 1 Аналіз умов функціонування залізничного транспорту України, Латвії, Литви та Естонії. 2 Аналіз наукових досліджень в області перевезень зернових вантажів. 3 Аналіз технології організації перевезень Транс'європейської транспортної мережі. 4 Формалізація процедури вибору схеми перевезень зернових вантажів на основі гри з природою. 5 Розробка вимог щодо формування автоматизованої системи вибору схем перевезень зернових вантажів в міжнародному сполученні з використанням теоретико-ігрового підходу. 6 Техніко-економічне обґрунтування від впровадження удосконаленої схеми перевезень зернових вантажів з використанням теоретико-ігрового підходу в межах залізничного коридору Україна-країни Балтії. Висновки.

5 Перелік графічного матеріалу: Ріст ВВП в загальній структурі економіки України, динаміка експорту товарів за період 2011-2023 рр, динаміка світового виробництва зернових за період 2019–2024 років, млн. т., динаміка світового споживання зернових за період 2019–2024 рр, експорт продукції агропромислового комплексу за видами транспорту за період 2021-2023 рр
Обсяги експорту до Латвії та Естонії за 2023 р., динаміка руху поїздів на RFC-8 (North Sea–Baltic Corridor) у період з 2018 по 2023 рік.

6 Консультанти окремих розділів

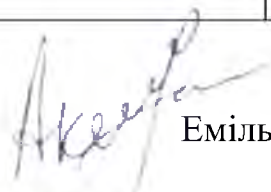
Розділ	Прізвище, ініціали, посада та науковий ступінь консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
Оцінка економічної ефективності проектного рішення	Наталія ГРИЦЕНКО, доцент, к.е.н		

7. Дата видачі завдання: 20.03.2025.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

Назва етапів	Строк виконання етапів	Примітка
1 Аналіз умов функціонування залізничного транспорту України, Латвії, Литви та Естонії	20.03.25	вик
2 Аналіз наукових досліджень в області перевезень зернових вантажів	05.04.25	вик
3 Аналіз технології організації перевезень Транс'європейської транспортної мережі	25.04.25	вик
4 Формалізація процедури вибору схеми перевезень зернових вантажів на основі гри з природою	01.05.25	вик
5 Розробка вимог щодо формування автоматизованої системи вибору схем перевезень зернових вантажів в міжнародному сполученні з використанням теоретико-ігрового підходу	12.05.25	вик
6 Техніко-економічне обґрунтування від впровадження удосконаленої схеми перевезень зернових вантажів з використанням теоретико-ігрового підходу в межах залізничного коридору Україна-країни Балтії	05.06.25	вик
Висновки. Оформлення роботи.	15.06.25	вик

Студент



Еміль АКОПЯН

Керівник



Андрій ПРОХОРЧЕНКО

Зміст

1 Аналіз умов функціонування залізничного транспорту України, Латвії, Литви та Естонії	11
1.1 Аналіз ринку перевезень зернових вантажів в Україні	11
1.2 Перевезення зернових вантажів різними видами транспорту	15
1.3 Аналіз умов функціонування залізничного транспорту країн Балтії	20
2 Аналіз наукових досліджень в області перевезень зернових вантажів	28
3 Аналіз технології організації перевезень Транс'європейської транспортної мережі	43
3.1 Загальний аналіз Транс'європейської транспортної мережі	43
3.2 Аналіз показників коридору North Sea – Baltic Corridor	44
4 Формалізація процедури вибору схеми перевезень зернових вантажів на основі гри з природою	49
5 Розробка вимог щодо формування автоматизованої системи вибору схем перевезень зернових вантажів в міжнародному сполученні з використанням теоретико-ігрового підходу	52
5.1 Передумови створення автоматизованої системи вибору схем перевезень зернових вантажів	52
5.2 Аналіз системи замовлення і обробки заявок у коридорах RFC	53
5.3 Розробка вимог до автоматизованої системи вибору схем перевезень зернових вантажів в міжнародному сполученні	57

					УСПЗВ.200.00.00 ПЗ			
Змн.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата	Удосконалення схем перевезень зернових вантажів на основі теоретико-ігрового підходу	Літ.	Арк.	Аркушів
Розроб.		Акопян Е.Л.					6	70
Перевір.		Проخورченко						6
Реценз.						УкрДУЗТ		
Н. Контр.		Проخورченко						
Затверд.		Буцько						

6 Техніко-економічне обґрунтування від впровадження удосконаленої схеми перевезень зернових вантажів з використанням теоретико-ігрового підходу в межах залізничного коридору Україна-країни Балтії	61
Висновки	67
Список використаних джерел	69

					УСПЗВ. 200.00.00 ПЗ	1Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		7

Вступ

У сучасних умовах функціонування залізничного транспорту України особливої ваги набуває проблема підвищення ефективності перевезень зернових вантажів. Зерно є одним із ключових експортно орієнтованих вантажів, обсяги перевезень якого мають високу сезонну та просторову варіативність. Це створює додаткове навантаження на залізничну інфраструктуру, зокрема в напрямку портів, і потребує оперативного прийняття рішень щодо раціонального використання провізної спроможності, маневрових ресурсів та погодження графіка руху.

Водночас умови конкуренції між учасниками перевізного процесу вантажовласниками, операторами рухомого складу, інфраструктурними компаніями - потребують узгодження стратегій, що забезпечують як економічну ефективність, так і технологічну доцільність схем перевезень. У цьому контексті особливої актуальності набуває застосування теоретико-ігрового підходу, який дозволяє моделювати поведінку зацікавлених сторін у ситуаціях конфлікту або кооперації, знаходити компромісні рішення та формалізувати процес прийняття рішень в умовах обмежених ресурсів.

Теоретико-ігрові моделі, зокрема задачі з нульовою та ненульовою сумою, багаторівневі ігри та моделі з неповною інформацією, забезпечують можливість більш глибокого аналізу стратегічної взаємодії між учасниками транспортного процесу. Їх використання для удосконалення схем перевезень дозволяє сформувати адаптивні механізми розподілу інфраструктурних потужностей, оптимізувати маршрути та черговість перевезень, підвищити узгодженість дій в умовах дефіциту провізної спроможності.

Таким чином, розробка і впровадження теоретико-ігрових методів в управління перевезеннями зернових вантажів є актуальним напрямом досліджень, що відповідає сучасним викликам транспортної галузі України, сприяє забезпеченню продовольчої безпеки, збереженню конкурентних переваг

в аграрному експорті та інтеграції в європейський логістичний простір.

Метою дослідження є підвищення ефективності вантажних міжнародних перевезень на залізничному транспорті України на основі удосконалення схем перевезень зернових вантажів з використанням теоретико-ігрового підходу. Це дозволить підвищити ефективність планування перевезень і, як наслідок, зменшити витрати та врахувати логістичні особливості.

Основні завдання:

1. Провести аналіз умов функціонування залізничного транспорту України, Латвії, Литви та Естонії.
2. Дослідити технологію організації перевезень Транс'європейської транспортної мережі.
3. Сформувати математичну модель вибору схем перевезень зернових вантажів в міжнародному сполученні з використанням теоретико-ігрового підходу.
4. Розробити вимоги щодо формування автоматизованої системи вибору схем перевезень зернових вантажів в міжнародному сполученні з використанням теоретико-ігрового підходу.
5. Виконати економічне обґрунтування від впровадження удосконаленої схеми перевезень зернових вантажів з використанням теоретико-ігрового підходу в межах залізничного коридору Україна-країни Балтії.

Об'єктом дослідження є процес вантажних перевезень в міжнародному сполученні.

Предметом дослідження є процедури вибору схем перевезень зернових вантажів в міжнародному сполученні з використанням теоретико-ігрового підходу.

Елементи наукової новизни: В межах даної кваліфікаційної роботи удосконалено процедуру вибору схеми перевезень зернових вантажів з використанням теоретико-ігрового підходу. Вперше:

– удосконалено процедуру вибору схеми перевезень зернових вантажів на основі математичної моделі “гри з природою” з перетворення її до задачі

лінійного програмування, що, на відміну від існуючих, дозволяє врахувати стратегії використання різних комбінацій маршрутів на залізничному та автомобільному транспорті, сценарії ризиків затримки при русі коридором TEN-T при заданих вхідних параметрах та обмеженнях. Проведені експериментальні розрахунки та отримані результати - запропоновано використання всі чотирьох вибраних маршрутів пропорційно найнижчій вартості та використання залізниці та автомобілей. Ця стратегія гарантує максимальні витрати не вище 111 млн. грн у найгіршому сценарії затримок;

доопрацьовано склад функціональних задач інформаційно-керуючої системи залізничного транспорту, які є основою для формування системи підтримки прийняття рішень працівників пов'язаних з вибором схем перевезень зернових вантажів та пошуку залізничних маршрутів руху через Трансєвропейську мережу TEN-T в межах локальної комп'ютерної мережі, яка інтегрована до системи АСК ВП УЗ-Є та PCS (Path Coordination System).

Матеріали кваліфікаційної магістерської роботи опубліковані у фаховому виданні МОН України [1].

1 Аналіз умов функціонування залізничного транспорту України, Латвії, Литви та Естонії

1.1 Аналіз ринку перевезень зернових вантажів в Україні

Агропромисловий комплекс (АПК) України відіграє ключову роль в національній економіці, будучи одним із провідних секторів, що забезпечує продовольчу безпеку, експортний потенціал та розвиток сільських територій. Він робить вагомий внесок у формування ВВП, забезпечує робочими місцями значну частину населення та генерує суттєві валютні надходження завдяки експорту зернових, олійних культур і продукції переробки. Також АПК стимулює розвиток суміжних галузей – машинобудування, логістики, харчової промисловості – і виступає стратегічним чинником економічної стабільності та зростання України.

На 2023 рік спостерігається зростання ролі держави у загальній структурі ВВП через значні видатки у сфері національної безпеки та оборони, рисунок 1.1[2].

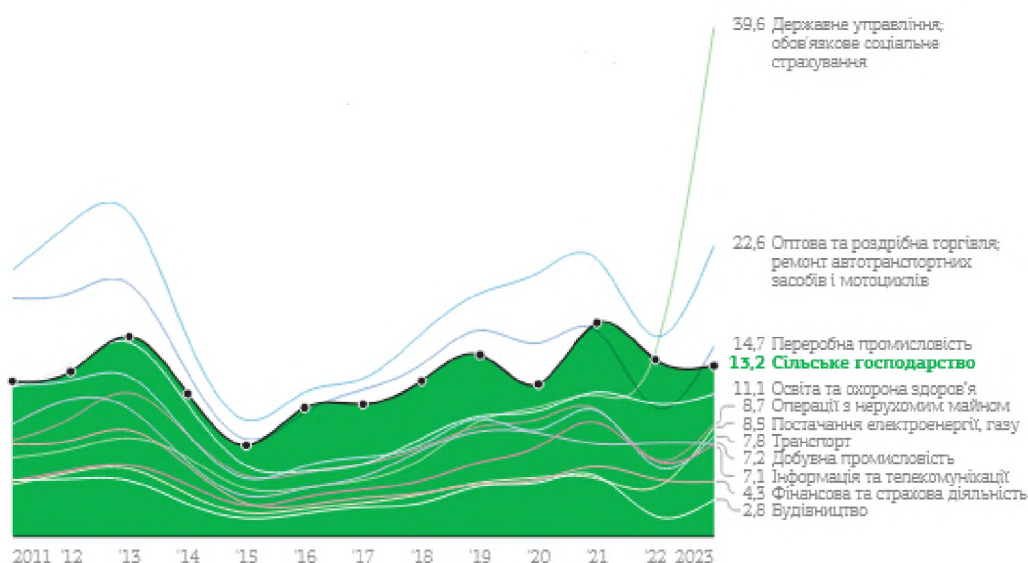


Рисунок 1.1 – Ріст ВВП в загальній структурі економіки України, млрд. дол. США

Водночас спостерігається зниження внеску агросектору у ВВП на тлі більш швидкого відновлення інших галузей, зокрема промисловості, будівництва тощо. Проте агросектор зберігає лідерство за обсягами експорту, забезпечуючи понад 40% експортної виручки, що значно перевищує показники інших галузей, таких як металургія та машинобудування, рисунок 1.2.

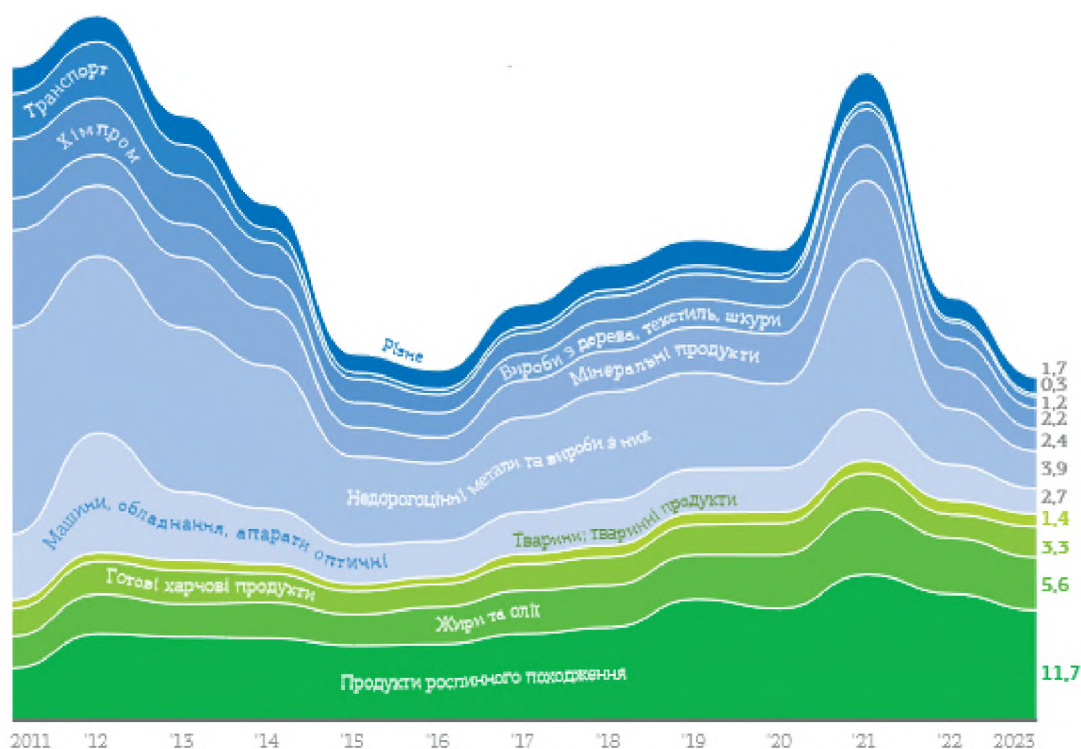


Рисунок 1.2 – Динаміка експорту товарів за період 2011-2023 рр, млрд. дол. США

Як видно з рисунку 2, з 2018 року спостерігається динаміка підвищення експорту продуктів рослинного походження, що збігається зі світовим трендом. Так, світові тенденції виробництва та споживання зернової продукції у період 2019–2024 років демонструють загальне зростання з незначними коливаннями, зумовленими погодними умовами, геополітичними подіями та економічними факторами, рисунок 1.3.

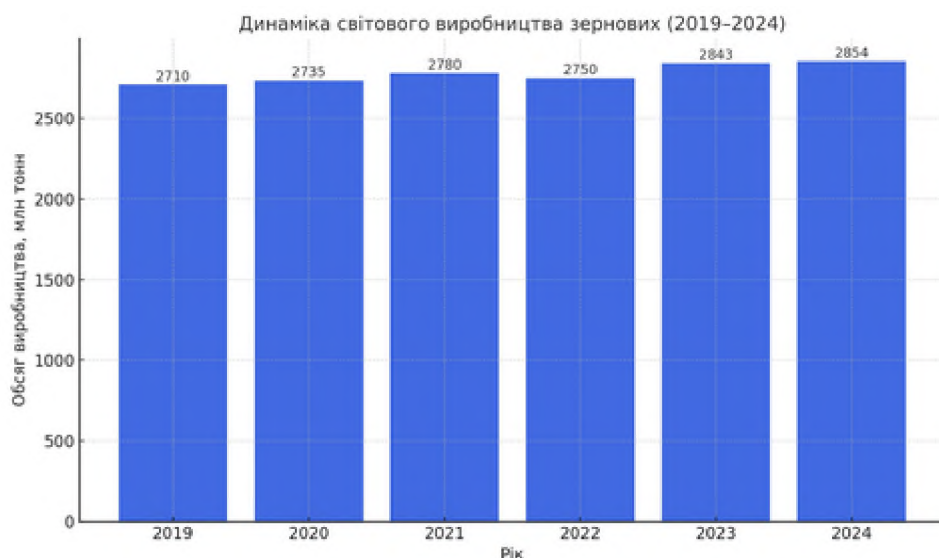


Рисунок 1.3 - Динаміка світового виробництва зернових за період 2019–2024 років, млн. т.

Зокрема, у 2024 році світове виробництво зернових досягло рекордного рівня в 2,854 млн тонн, що на 0,4% більше порівняно з 2023 роком. Це зростання обумовлене покращенням врожаїв кукурудзи в Аргентині, Бразилії, Туреччині та Україні, а також збільшенням виробництва пшениці в Азії, зокрема в Пакистані. При цьому основними культурами є: кукурудза з найбільшим внеском у загальне виробництво, з обсягом близько 1,206 млн тонн у 2024 році; пшениця, виробництво якої зросло до 813 млн тонн, що на 0,6% більше порівняно з попереднім роком та рис, рекордне виробництво якого очікується в 535,1 млн тонн у сезоні 2024/25[3].

За географічним розподілом можна відмітити, що найбільшими виробниками зернових у 2023 році були Китай, США, Індія, Бразилія та росія. Україна за результатами 2023-2024 МР займала 15% світового експорту за тоннажем кукурудзи, 10% ячменя та 8% пшениці [2].

Водночас спостерігається стала тенденція зростання світового споживання зернових за останні п'ять років, рисунок 1.4. Помітне різке зростання у 2023 році, ймовірно, пов'язане з відновленням попиту після пандемії та адаптацією до геополітичних змін.

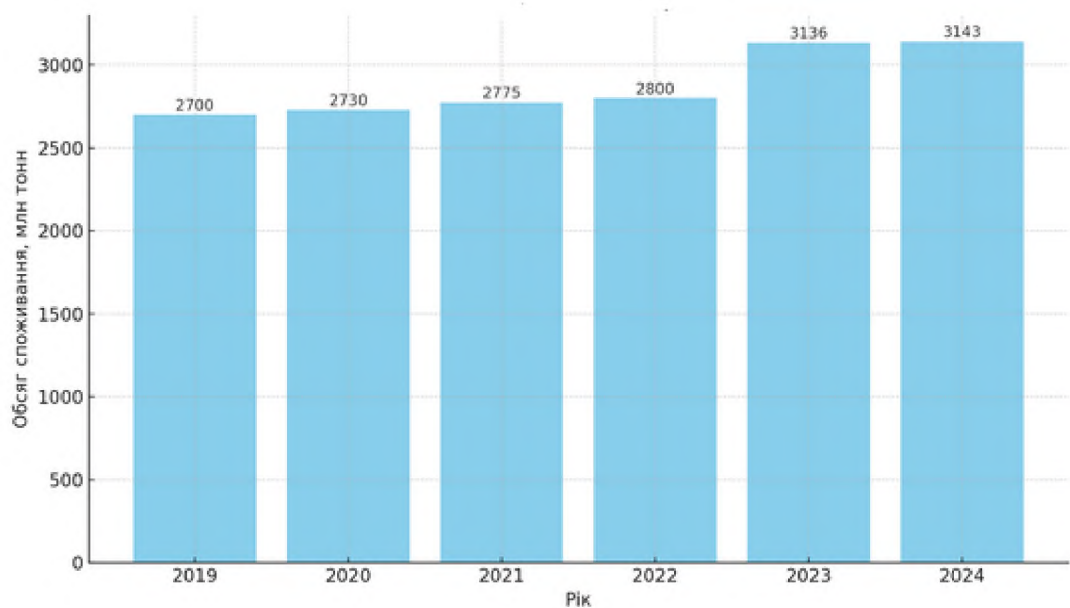


Рисунок 1.4 - Динаміка світового споживання зернових за період 2019–2024 рр, млн. т

Світове споживання зернових у 2024 році склало 3,143 млн тонн, що на 0,2% більше порівняно з 2023 роком. Зростання споживання було стабільним протягом останнього десятиліття, з середньорічним приростом близько 1,2%[4]. При цьому основними споживачами є Китай -найбільший споживач із обсягом 686 млн тонн у 2024 році, Індія зі споживанням 360 млн тонн та США зі споживанням 351 млн тонн.

За видами зернових кукурудза залишається основним кормом для тваринництва, спостерігається зростання споживання на 1,3% щорічно; споживання пшениці зростає на 0,9% щорічно, особливо в Азії, де спостерігається сталий попит на продукти з високим вмістом білка.

Очікується, що до 2035 року світове споживання зернових досягне 3,466 млн тонн, зі щорічним приростом на 0,9%. Основне зростання буде зумовлене збільшенням населення в країнах Азії та Африки [4].

Однак прогнозуються і виклики. Серед ключових факторів, що можуть вплинути на ринок зернових у майбутньому, виділяють зміни клімату, геополітичну нестабільність та коливання цін на енергоносії, що впливають на витрати на виробництво та логістику.

1.2 Перевезення зернових вантажів різними видами транспорту

Перевезення зернових вантажів в Україні відбувається за допомогою автомобільного, залізничного та річкового транспорту.

1.2.1 Перевезення зернових вантажів автомобільним транспортом

Перевезення зернових вантажів автомобільним транспортом в Україні є ключовою складовою аграрної логістики, особливо на внутрішньому ринку та при доставці до портів і залізничних вузлів.

Більшість підприємців, здійснюючи перевезення зерна як територією України, так і за її межами, віддають перевагу автомобільному транспорту. Такий вид перевезення має свою специфіку та потребує дотримання певних вимог.

Варто відзначити основні правила транспортування зерна автомобілем:

- перевищення максимально допустимої вантажопідйомності заборонене;
- завантаження кузова має бути щільним;
- транспортний відсік повинен бути герметичним;
- перед завантаженням зерна кузов необхідно піддати санітарній обробці;
- усі супровідні документи слід підготувати заздалегідь, без помилок.

Зернові вантажі перевозять як у тарі, так і без неї. У випадку тарного перевезення використовують сухі, чисті мішки без сторонніх запахів. Для безтарного транспортування застосовують спеціалізовані зерновози, багажні відділення яких повинні бути обов'язково закриті брезентом або тентом.

Типи зерновозів, які застосовуються в Україні:

Бортові зерновози – з відкритим верхом, що прикривається тентом для захисту вантажу від опадів.

Автопотяги-зерновози – з додатковим причепом, що дозволяє перевозити більші обсяги зерна.

Самоскидні зерновози – здатні транспортувати до 40 тонн і значно спрощують процес завантаження й розвантаження.

Щоб забезпечити якісне перевезення, зерновоз має відповідати багатьом технічним та санітарним вимогам. Основне завдання перевізника – зберегти зерно в належному стані, чого можна досягти завдяки використанню відповідної тари та герметичного накриття кузова.

Особливості тари: при перевезенні зерна фурами зазвичай використовують щільні сухі мішки, які не мають запаху чи слідів шкідників. Завантаження й розвантаження має відбуватися акуратно, щоб уникнути пошкодження тари. Мішки встановлюються на дерев'яні піддони, а зверху вантаж накривається тентом.

Тенти для зерновозів. Незалежно від типу транспортного засобу – зерновоз чи фура – кузов необхідно оснастити захисним покриттям. Тент запобігає потраплянню бруду, вологи, атмосферних опадів і бензинових випарів, а також знижує втрати продукції від вивітрювання.

До переваг перевезення автомобільним транспортом можна віднести:-

- гнучкість маршрутів, оскільки автомобілі можуть доставляти зерно безпосередньо від господарства до елеватора, складу або порту, минаючи проміжні перевантаження;
- швидкість доставки, особливо на коротких і середніх відстанях, автомобільний транспорт забезпечує оперативні перевезення, що важливо в сезон збирання врожаю;
- можливість доставок у важкодоступні місця, особливо у сільські райони, які не мають залізничного сполучення;
- мінімальні вимоги до інфраструктури, оскільки не потрібно прокладати колії або будувати спеціальні термінали;
- зручність у плануванні та управлінні логістикою, оскільки простіше координувати невеликі партії та оптимізувати завантаження.

Однак необхідним є визначити і недоліки, серед яких:

- висока собівартість –у перерахунку на тонну-км, автомобільні перевезення часто дорожчі за залізничні чи водні;
- обмежена вантажопідйомність, так стандартна фура перевозить 20–25 тонн зерна, тоді як залізничний вагон - до 70 тонн;
- залежність від стану доріг і погодних умов, що є особливо критичним під час дощів, на ґрунтових дорогах чи взимку;
- регламентовані обмеження на вагу, перевантаження може призвести до штрафів і пошкодження дорожнього покриття;
- підвищений ризик втрат і псування вантажу - без належного тентування зерно може зазнати впливу вологи, пилу або втратитися через вивітрювання.

Головними маршрутами автомобільних перевезень є доставка зерна до портів Одеси, Миколаєва та інших експортних хабів, а також до західних прикордонних переходів для подальшого експорту до Європи [5].

1.2.2 Перевезення зернових вантажів річковим транспортом

На даний час річковий транспорт становить близько 9% від загального обсягу перевезень зерна в Україні. Однак, з огляду на обмеження в інших видах транспорту, його частка може зростати. Компанії, такі як "Укррічфлот", активно розвивають річкову логістику, зокрема через порти в Дніпрі, Запоріжжі, Херсоні та Миколаєві [6].

У 2023 році Україна та Румунія підписали угоду про збільшення експорту українського зерна через румунську територію, зокрема використовуючи порти на Дунаї, що свідчить про зростаючу роль річкових маршрутів у забезпеченні експорту аграрної продукції.

Отже, перевезення зернових вантажів річковим транспортом в Україні є перспективним напрямом аграрної логістики, особливо в умовах обмеженого доступу до морських портів та перевантажених залізничних маршрутів.

До основних переваг річкових перевезень зерна можна віднести:

- високу енергоефективність та екологічність, оскільки річковий транспорт споживає в 5–10 разів менше енергії на тонно-кілометр порівняно з автомобільним або залізничним, що робить його більш екологічним та економічним у довгостроковій перспективі;
- значну вантажопідйомність, так, баржі здатні перевозити великі обсяги зерна за один рейс, що зменшує кількість перевезень та витрати на логістику;
- розвинену мережу річкових портів, Україна має добре розвинену річкову інфраструктуру, зокрема на Дніпрі, де розташовані порти в Києві, Дніпрі, Запоріжжі, Херсоні та Миколаєві.
- альтернатива морським та залізничним маршрутам: Річковий транспорт може слугувати альтернативним шляхом для експорту зерна, особливо через порти на Дунаї, такі як Рені та Ізмаїл, що набули стратегічного значення після обмеження доступу до Чорноморських портів.

Поряд з цим є виклики та обмеження:

- необхідність інвестицій - розвиток річкових перевезень вимагає значних вкладень у модернізацію флоту, будівництво та оновлення річкових терміналів, що може впливати на вартість перевезень;
- сезонність навігації, бо річкові перевезення залежать від сезонних умов, зокрема рівня води в річках, що може обмежувати їх використання в певні періоди року;
- інфраструктурні обмеження. Деякі ділянки річкових шляхів потребують днопоглиблювальних робіт та модернізації шлюзів для забезпечення безперешкодного проходження суден;
- обмежений доступ до деякої інфраструктури у період воєнних дій.

Не зважаючи на недоліки, перевезення зерна з полів до елеваторів зараз відбувається тільки автомобільним транспортом.

1.2.3 Перевезення зернових вантажів залізничним транспортом

Перевезення зернових вантажів залізничним транспортом в Україні є ключовим елементом аграрної логістики, особливо в умовах обмеженого доступу до морських портів. Залізниця забезпечує ефективне транспортування великих обсягів зерна до портів, елеваторів та на експорт, хоча останніми роками спостерігається зниження частки залізничного транспорту в експортних перевезеннях, рисунок 1.5.

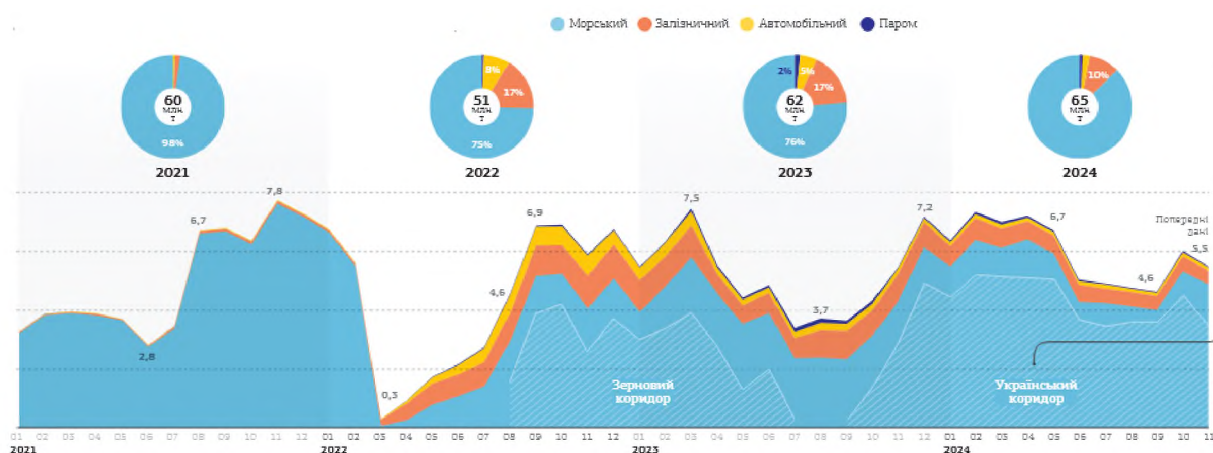


Рисунок 1.5 – Експорт продукції агропромислового комплексу за видами транспорту за період 2021-2023 рр, млн. т

Основними перевагами залізничного транспорту для зернових вантажів є:

- висока вантажопідйомність, так, спеціалізовані вагони-хопери можуть перевозити до 70 тонн зерна за один рейс, що значно перевищує можливості автомобільного транспорту;
- економічність на великі відстані, бо залізничні перевезення є більш вигідними при транспортуванні зерна на відстані понад 300 км, особливо для експортних поставок;
- низький рівень втрат вантажу. Зерно транспортується в закритих вагонах, що мінімізує вплив погодних умов та знижує ризик псування;

- масштабованість - залізниця здатна обслуговувати великі обсяги перевезень, що особливо важливо під час пікових сезонів збору врожаю.

Основні виклики та обмеження:

- інфраструктурні обмеження. Деякі ділянки залізничних колій потребують модернізації та ремонту, що може впливати на швидкість та регулярність перевезень;

- залежність від тарифної політики, оскільки зміни у тарифах на залізничні перевезення можуть впливати на загальні витрати аграріїв. Наприклад, плановане підвищення тарифів може збільшити логістичні витрати на \$3–6 за тонну, що викликає занепокоєння серед фермерів;

- обмеження на прикордонних переходах, бо переходи на західному кордоні України мають обмежену пропускну здатність, що може спричиняти затримки у перевезеннях на експорт.

Стосовно міжнародного сполучення в залізничних перевезеннях Україна активно співпрацює з сусідніми країнами, такими як Румунія, для розширення експортних маршрутів через їхню територію, що дозволяє компенсувати обмеження в доступі до Чорноморських портів.

1.3 Аналіз умов функціонування залізничного транспорту країн Балтії

Необхідним є зазначити, що ширина колії у Латвії, Литви, Естонії та України мають однакову ширину. Основна частина залізниць у Литві, Латвії та Естонії збудована за стандартом 1520 мм (радянська спадщина), що відрізняється від загальноєвропейського стандарту 1435 мм.

Довжина залізничних колій складає у Латвії – близько 1850 км, у Литві – понад 1750 км, в Естонії ~1200 км. Порівняльна діаграма довжини залізничних колій наведена на рисунку 1.6.



Рисунок 1.6 – Порівняння довжини залізничних колій України та країн Балтії, км

Необхідно зазначити, що електрифікація в цих країнах обмежена. Більшість маршрутів залишається неелектрифікованою, особливо у вантажному сегменті. Інфраструктура: порівняно розвинена, але має високу зношеність, що вимагає модернізації.

Щодо інституційних умов та ринку перевезень важливим є уточнити, що моделі управління однакові. У всіх трьох країнах діє модель вертикального розділення - інфраструктурна компанія діє окремо від операторів перевезень: Lietuvos Geležinkeliai (LTG) – Литва, Latvijas Dzelzceļš (LDz) – Латвія, Eesti Raudtee (EVR) – Естонія.

В країнах впроваджено лібералізований доступ до інфраструктури, однак на практиці національні оператори зберігають домінантне становище. Регуляторні органи: функціонують незалежно, у відповідності до вимог ЄС (директива 2012/34/ЄС).

Якщо аналізувати вантажні перевезення, то можна зазначити, що до 2022 року значна частка вантажів формувалась за рахунок транзиту з/до Росії та

Білорусі (напр., нафтопродукти, калійні добрива, вугілля). Після початку повномасштабної агресії РФ в Україні (2022) транзит різко скоротився: Латвія втратила понад 50% транзитного вантажопотоку; Литва припинила перевезення білоруських добрив (основне джерело доходу LTG Cargo).

Сьогодні активно розвивається напрям обслуговування українського експорту (зерно, метали) через порти Клайпеда, Вентспілс, Мууга. Основні вантажі: агропродукція, добрива, нафтопродукти, деревина.

На рисунках 1.7, 1.8 представлено візуалізацію структури експорту товарів з України до країн Балтії у 2023 році, що ілюструє ступінь диверсифікації українського експорту та особливості товарної номенклатури в розрізі трьох країн - Литви, Латвії та Естонії.

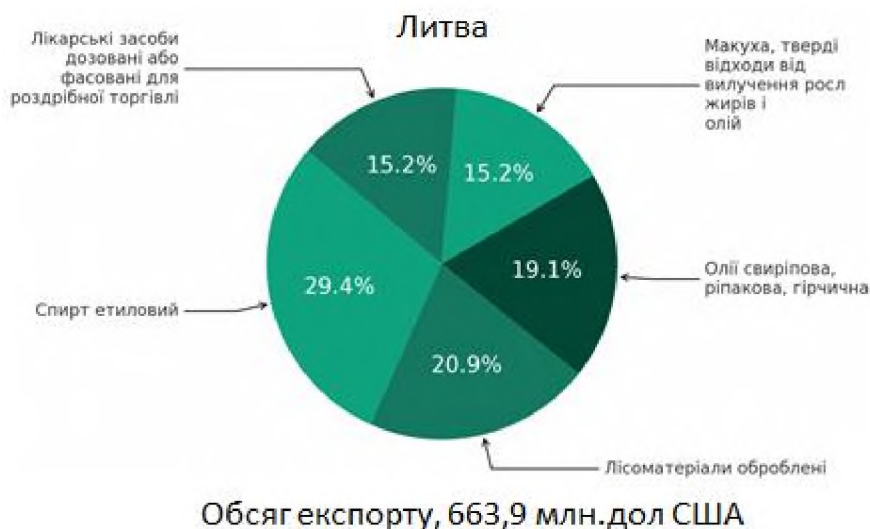


Рисунок 1.7 – Обсяг експорту до Литви за 2023 р.

Загальна сума експорту до цих країн становила: до Литви - 663,9 млн дол. США, до Латвії- 297,3 млн дол. США, до Естонії - 125,5 млн дол. США.

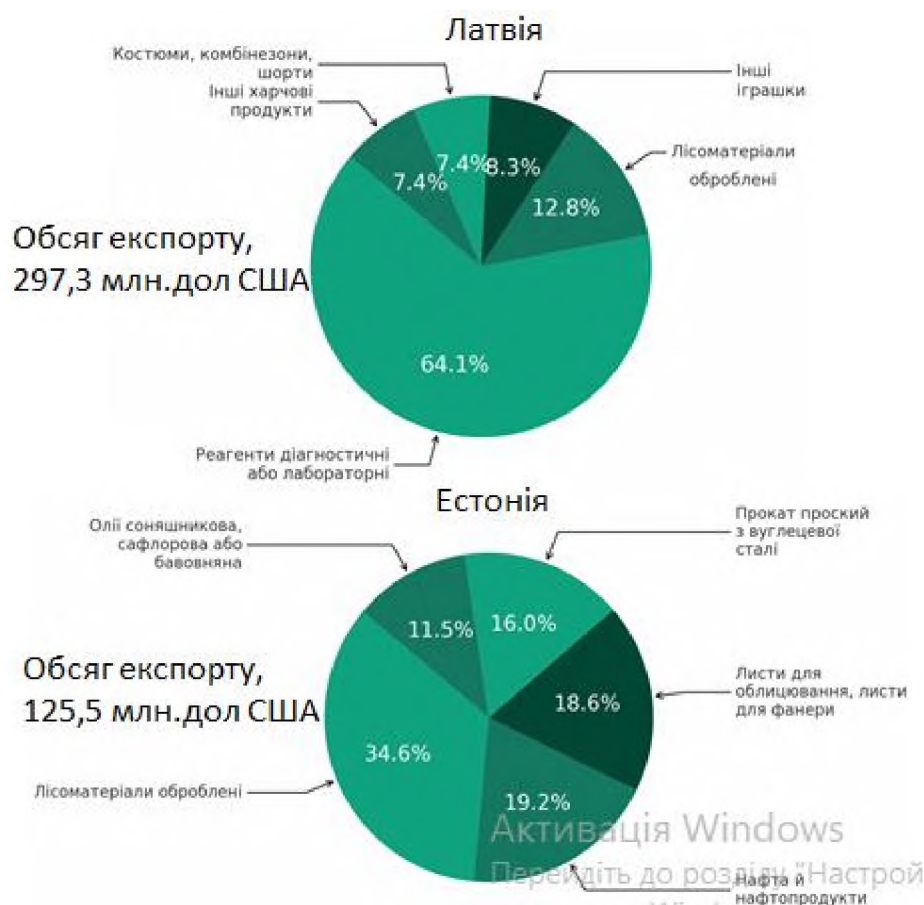


Рисунок 1.8 – Обсяги експорту до Латвії та Естонії за 2023 р.

Кругові діаграми демонструють частки основних груп товарів у структурі експорту до кожної країни. Зокрема: у Латвії найбільшу частку експорту становлять спирт етиловий (29,4 %), лікарські засоби (15,2 %), макуха та інші залишки переробки олійних культур (15,2 %) та нерафіновані олії (15,2 %).

У Латвії спостерігається концентрація експорту на реактивах для лабораторій та діагностики (64,1 %), а також оброблених лісоматеріалах (12,8 %), що свідчить про наявність нішевого, але стабільного попиту на продукцію з високою доданою вартістю.

До Естонії найбільше експортували оброблені лісоматеріали (34,6 %), листи та прокат сталі (18,6 % і 19,2 % відповідно), а також текстильну продукцію - олії, тканини та інші вироби (сукупно понад 25 %).

Представлені дані підтверджують, що український експорт до країн Балтії є диверсифікованим та охоплює широке коло галузей: харчову, фармацевтичну, деревообробну, хімічну, металургійну та легку промисловість. Водночас для кожної з країн спостерігається своя домінуюча товарна група, що відображає специфіку попиту і логістичних зв'язків на національному рівні.

Таким чином, країни Балтії виступають як стабільні зовнішньоторговельні партнери України, здатні не лише приймати масові сировинні вантажі, а й продукти з високою доданою вартістю, зокрема медичні препарати та промислові вироби.

В роботі проведено аналіз характеристики функціонування залізничного транспорту України, Латвії та Естонії за обсягами перевезених вантажів та тарифного вантажообігу в період з 2014 по 2020 роки.

На рисунку 1.9 наведено обсяги перевезених вантажів (млн тонн) на мережах залізниць трьох країн.

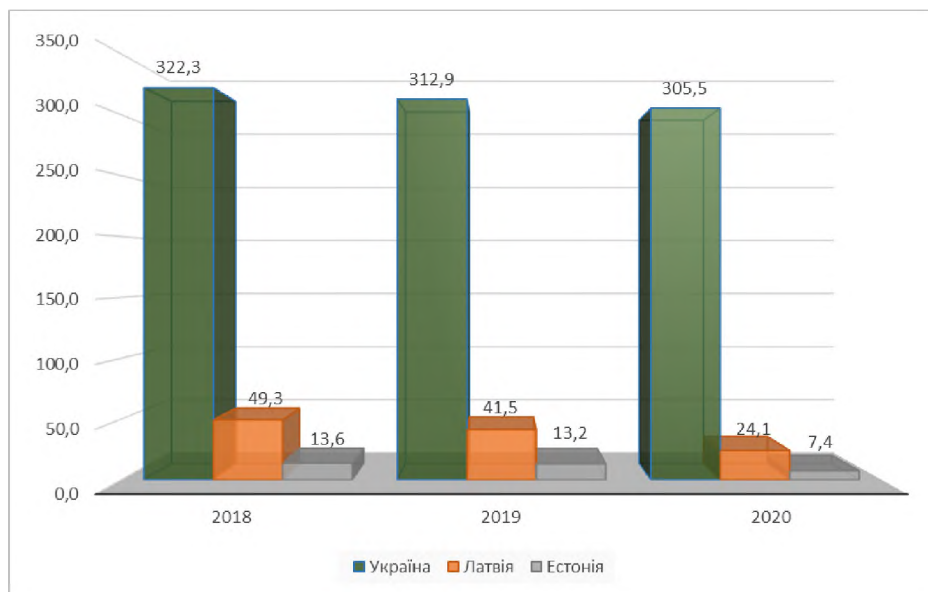


Рисунок 1.9 – Кількість перевезених вантажів, млн.тонн, на залізниці України, Латвії та Естонії

Усі роки демонструють значну перевагу України за масштабами вантажоперевезень: зокрема, у 2018 році перевезено 322,3 млн тонн, а в 2020 – 305,5 млн тонн. У Латвії протягом цього періоду спостерігається стійке зменшення обсягів: з 49,3 млн тонн (2018) до 24,1 млн тонн (2020). В Естонії обсяги стабільно нижчі: 13,6 млн тонн у 2018 та 7,4 млн тонн у 2020 році.

Ці дані свідчать про поступове скорочення обсягів залізничних перевезень у Балтійських країнах, що є наслідком зниження транзиту з РФ та Білорусі, а також переорієнтації частини вантажопотоків у межах ЄС.

На Рис. 2 подано порівняльний аналіз тарифного вантажообігу (млн т·км) між Україною та Латвією у 2014–2020 роках.

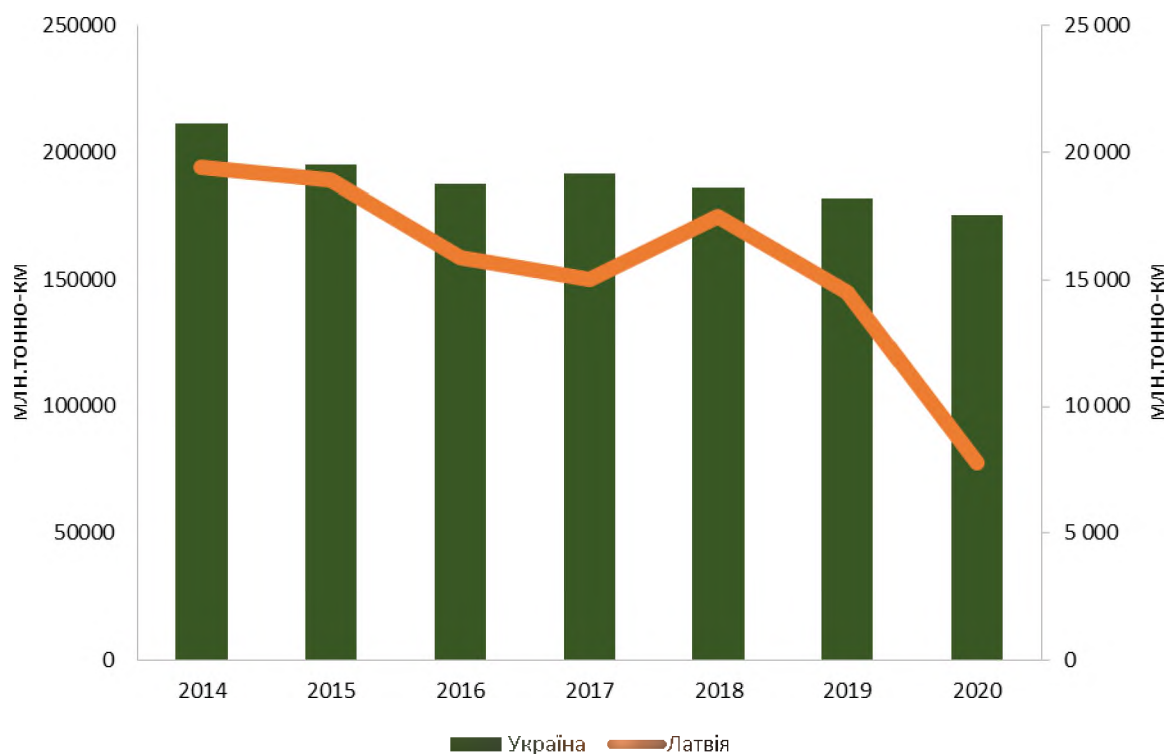


Рисунок 1.10 - Порівняльний аналіз тарифний вантажообіг на залізниці України та залізниці Латвії 2014-2020 рр.

На стовпчиковій діаграмі зображено вантажообіг України (ліве вертикальне поле), а лінійним графіком – динаміку тарифного вантажообігу Латвії (праве вертикальне поле).

З боку України спостерігається відносна стабільність вантажообігу протягом досліджуваного періоду, попри коливання в окремі роки. У Латвії ж вантажообіг демонструє чітку низхідну тенденцію: з понад 20 млрд т·км у 2014 році до менш ніж 10 млрд т·км у 2020.

Це підтверджує наявність стійкої деградації транзитного потенціалу Латвії, особливо внаслідок геополітичних змін, санкцій проти Білорусі та скорочення поставок російських вантажів.

Отже, можна зробити висновок про суттєву відмінність у масштабах та динаміці роботи залізничного транспорту України порівняно з країнами Балтії. Україна зберігає позиції великої залізничної держави як за обсягами перевезень, так і за вантажообігом. У той час як Латвія й Естонія, попри добре розвинену інфраструктуру, зазнають скорочення трафіку через втрату транзитних потоків зі східного напрямку. Це створює передумови для переорієнтації частини вантажопотоків із використанням української логістичної мережі та морських коридорів як альтернативи.

Також необхідним є сказати про інфраструктурні проєкти та виклики у країнах Балтії. Так, проєкт Rail Baltica має на меті інтеграцію Балтійських країн у мережу TEN-T (Транс'європейська транспортна мережа) через нову залізничну лінію стандарту 1435 мм. Траса: Варшава – Каунас – Рига – Таллінн. Стан: реалізація триває, завершення – орієнтовно 2030 рік. Одна є певні проблеми з реалізацією, зокрема, затримки фінансування, складна координація між країнами, інтеграція зі старою мережею 1520 мм.

При взаємодії України та країн Балтії можна виділити переваги та обмеження функціонування. До переваг можна віднести геостратегічне розташування як "транзитного мосту" між Сходом і Північчю Європи; участь в європейських транспортних ініціативах (TEN-T, Rail Baltica); наявність потужних портів з підведеною залізничною інфраструктурою.

Одночасно є певні обмеження, зокрема залежність від вантажопотоків з/до третіх країн (особливо у минулому – РФ/Білорусь); низька частка електрифікованих ліній; висока вартість обслуговування інфраструктури через роздробленість; повільна інтеграція з мережею ЄС за колією 1435 мм.

За таких умов актуальними напрямками розвитку є диверсифікація вантажопотоку: заміна російських/білоруських вантажів на українські агропродукти та імпорт з ЄС; модернізація локомотивного парку та переходи

на альтернативне паливо (водень, гібриди); цифровізація перевезень: впровадження ERTMS, автоматизованих систем диспетчеризації; пошук нових логістичних рішень: розвиток інтермодальних терміналів, short-sea shipping.

Отже, торгівля України з Балтійськими країнами - це значущий компонент експортної стратегії, особливо для аграрної продукції та харчової індустрії і кооперація між нами є важливою у пошуку нових ринків та розвитку нових напрямів руху, що включають для нас і скандинавські країни.

2 Аналіз наукових досліджень в області перевезень зернових вантажів

Стаття авторів [7] присвячена удосконаленню логістики перевезень зернових вантажів залізничним транспортом шляхом розробки стохастичної моделі формування ступінчастих маршрутів. У роботі проаналізовано сучасний стан організації перевезень зернових вантажів в Україні, зокрема виявлено проблеми, пов'язані з високим рівнем зношеності вагонного парку (понад 97,8%), нестачею тягового рухомого складу та збільшенням обороту вагонів, що призводить до зниження їх продуктивності. Автори акцентують увагу на необхідності вдосконалення технології формування маршрутів для підвищення ефективності перевезень зерна. Метою дослідження є розробка стохастичної моделі формування ступінчастих маршрутів для перевезення зернових вантажів, яка враховує ймовірнісний характер тривалості простою вагонів на станції формування. Для досягнення цієї мети авторами було поставлено такі завдання: аналіз сучасного стану організації перевезень зернових вантажів залізничним транспортом; виявлення ключових факторів, що впливають на збільшення обороту вагонів-зерновозів та зменшення їх продуктивності; розробка стохастичної моделі формування ступінчастих маршрутів, яка дозволяє визначити оптимальну кількість вагонів у маршрутній відправці з урахуванням ймовірнісного характеру тривалості простою вагонів на станції формування.

У дослідженні використано статистичний аналіз даних про тривалість простою вагонів на станції Ромодан за період березень – серпень 2019 року. Встановлено, що тривалість простою вагонів є випадковою величиною, яка підпорядковується розподілу Ерланга другого порядку. На основі цього розподілу розроблено стохастичну модель формування ступінчастих маршрутів, яка дозволяє визначити оптимальну кількість вагонів у маршрутній відправці з урахуванням ймовірнісного характеру тривалості простою вагонів на станції формування.

Було зроблено висновки, що розроблена стохастична модель формування ступінчастих маршрутів із зерновими вантажами дозволяє визначити оптимальну кількість вагонів у маршрутній відправці з урахуванням ймовірнісного характеру тривалості простою вагонів на станції формування. Використання запропонованої моделі дає змогу зменшити непродуктивні простої вагонів та виключити переробку на шляху прямування, що сприяє підвищенню ефективності перевезень зернових вантажів залізничним транспортом. Реалізація моделі на станції Ромодан показала її ефективність у практичному застосуванні, що свідчить про доцільність впровадження моделі в автоматизовані робочі місця оперативного персоналу для оптимізації процесу формування маршрутів.

Ця робота є вагомим внеском у розвиток логістики залізничних перевезень зернових вантажів в Україні, оскільки пропонує науково обґрунтовану модель, яка враховує реальні умови експлуатації та дозволяє підвищити ефективність використання рухомого складу.

Стаття [8] присвячена підвищенню ефективності логістики залізничних перевезень зерна в Україні шляхом оптимізації формування ступінчастих маршрутів. Метою статті є розробка науково обґрунтованих підходів до організації перевезень зернових вантажів залізничним транспортом, зокрема шляхом удосконалення формування ступінчастих маршрутів. Основні завдання дослідження включають: аналіз існуючих проблем у перевезеннях зернових вантажів, таких як неефективне використання вагонного парку та затримки в доставці; розробка моделі формування ступінчастих маршрутів, яка враховує специфіку зернових перевезень та інфраструктурні обмеження; оцінка впливу запропонованих змін на ефективність перевезень та використання ресурсів.

У дослідженні використано комплексний підхід, що включає: аналіз статистичних даних, зокрема оцінку поточних показників перевезень зернових вантажів, включаючи обсяги, маршрути та час доставки. Моделювання логістичних процесів з розробкою математичних моделей для оптимізації формування ступінчастих маршрутів.

Автор зазначає, що на сьогоднішній день перевезення зернових вантажів є одним із провідних чинників, що визначає темпи розвитку національної економіки. Центри формування таких вантажів розташовані майже по всій території України, що зумовлює високу актуальність цієї проблематики. Ринок транспортування зернових характеризується значною чутливістю до зовнішніх умов. З огляду на постійні зміни в галузі перевезень, інфраструктурний оператор зобов'язаний оперативно реагувати на них у режимі реального часу. У результаті цього виникають певні недоліки в логістиці зернових, зокрема - простої вагонів як порожніх, так і завантажених, що, у свою чергу, спричиняє зростання експлуатаційних витрат.

Автором було проведено аналіз місячної динаміки навантаження зернових вантажів на ділянці Регіональної філії «Південна залізниця», який свідчить про загальну рівномірність процесу навантаження, що підтверджується коефіцієнтом нерівномірності на рівні 0,2. Водночас, у серпні-вересні спостерігається помітне відхилення, пов'язане зі збором урожаю соняшника, кукурудзи, сої та інших культур. Враховуючи показник нерівномірності, обсяг вантажопотоку на ділянці та маршрутну норму в 50 вагонів, середній час, необхідний для формування одного маршруту, становить близько 4 діб. У процесі прийняття рішень щодо оптимізації логістики перевезень зернових слід обов'язково враховувати характер вантажоутворення в сучасних умовах. Цей вид вантажів є важливою складовою глобальних економічних процесів, тому при плануванні перевезень, окрім сезонних змін, зумовлених природними чинниками, необхідно зважати також на зовнішні впливи: зобов'язання між трейдерами та експортерами, коливання валютних курсів та інші фактори.

Автор вказує, що основними умовами, які необхідно враховувати під час формування маршруту, є дотримання вимог, що забезпечують ефективність такого варіанту перевезення. До них належать:

- зниження експлуатаційних витрат інфраструктурного оператора шляхом проходження технічних і дільничних станцій без виконання операцій з переробки;
- скорочення часу обігу вагонів завдяки мінімізації технологічних процедур під час руху;
- можливість подальшого застосування сформованого маршруту для подачі на інші дільниці у разі виникнення такої потреби.

Результати дослідження свідчать про те, що впровадження удосконаленої моделі формування ступінчастих маршрутів може призвести до: підвищення ефективності перевезень за рахунок зменшення часу доставки та покращення використання вагонного парку.

Таким чином, дослідження автора надає практичні рекомендації щодо вдосконалення організації перевезень зернових вантажів залізничним транспортом в Україні, що є актуальним для підвищення конкурентоспроможності аграрного сектору країни.

Стаття авторів[9] присвячена підвищенню ефективності експортних залізничних перевезень зерна в Україні шляхом впровадження відправницької маршрутизації та концентрації навантаження на термінальних зернових елеваторах. Метою дослідження була оптимізація логістичного ланцюга постачання зерна до морських портів України. Автори пропонують створити мережу експортно-орієнтованих зернових елеваторів, які дозволять формувати маршрутні поїзди, зменшити логістичні витрати та підвищити конкурентоспроможність українського зерна на світовому ринку.

У дослідженні автори зазначають, що логістичні витрати в Україні становлять значну частину у структурі собівартості українського зерна - приблизно 35%. Для порівняння, у країнах Європейського Союзу цей показник коливається в межах 12–16%, а у США - лише 9%. У довоєнні роки основний обсяг експорту зерна з України (близько 97%) здійснювався через морські порти, причому 63% вантажів до них доставлялися залізничним транспортом. У зв'язку з цим, підвищення ефективності перевезень зернових залізницею та

внутрішніми водними шляхами стає пріоритетним напрямом для зменшення логістичних витрат. Крім того, розробка ефективних логістичних маршрутів за участю залізничного транспорту може сприяти посиленню енергетичної незалежності України.

У роботі використано такі методи: агломеративний кластерний аналіз: для вибору залізничних вузлів, де доцільно концентрувати навантаження зерна; DSU-алгоритм (Disjoint Set Union): для визначення перекривних та неперекривних зон концентрації навантаження; багатокрітеральна оптимізація: формалізація задачі вибору неперекривних зон як задачі цілочисельного програмування з булевими змінними; модифікований симплекс-алгоритм: для вирішення задачі оптимального розміщення 24 зон концентрації навантаження, що охоплюють 70 станцій.

Автори зазначають, що запропонована модель дозволяє забезпечити маршрутизацію близько 7,5 млн тонн зерна на рік з мінімальними додатковими витратами. Формування маршрутних поїздів на основі концентрації навантаження сприяє зниженню логістичних витрат у ланцюгу постачання зерна до портів. Розроблена математична процедура враховує економічну ефективність процесу та може бути використана для планування. Зроблено висновки, що впровадження запропонованої моделі сприятиме зменшенню витрат на транспортування зерна, підвищенню ефективності використання залізничного транспорту, зміцненню позицій України на світовому зерновому ринку.

Стаття авторів [10] присвячена аналізу та вибору оптимальної технології доставки зернових вантажів у контейнерах у міжнародному сполученні. Метою дослідження є визначення найбільш ефективної технологічної схеми доставки зерна в контейнерах для міжнародних перевезень. Автори розглядають три альтернативні варіанти транспортування зерна до порту відправлення: з використанням залізничного транспорту (вагони-зерновози); з використанням автомобільного транспорту (зерновози); з використанням контейнерів, що перевозяться залізничними вагонами.

У дослідженні було застосовано комплексний підхід, який включає: моделювання системи доставки зерна з урахуванням вхідних параметрів (обсяг відправлення, відстань транспортування) та вихідних параметрів (загальні витрати на доставку від елеватора до порту). Врахування зовнішніх факторів, таких як час навантаження/розвантаження, середня технічна швидкість транспортування, простої на митниці. Розробка повного факторного плану експерименту, що складається з 9 серій експериментів. Побудова лінійної регресійної моделі для визначення ступеня впливу кожного фактора на ефективність доставки.

Автори роблять висновки, що найбільший вплив на ефективність доставки має відстань транспортування при обсязі відправлення 200 тонн. Контейнерні перевезення зерна мають потенціал для зниження логістичних витрат, особливо при мультимодальних схемах доставки. Розроблена модель дозволяє обґрунтовано обирати оптимальну технологію доставки зернових вантажів у контейнерах у міжнародному сполученні. Результати дослідження можуть бути використані для: оптимізації логістичних схем доставки зерна на експорт; зниження витрат на транспортування та підвищення конкурентоспроможності українського зерна на міжнародному ринку; розробки стратегій розвитку контейнерних перевезень зернових вантажів.

Повною та обґрунтованою працею є дисертаційна робота [11], присвячена підвищенню ефективності залізничних перевезень зернових вантажів шляхом використання райдшерингового сервісу для об'єднання вантажовідправників з метою організації ступеневих маршрутів на залізничній мережі України. Такий підхід може сприяти пришвидшенню руху вагонних відправок із зерновими вантажами та зменшенню простоїв вагонів на технічних станціях.

Наукова новизна дисертаційної роботи полягає в розв'язанні наукової проблеми, що стосується теоретичного обґрунтування ефективності впровадження моделі перевезення зернових вантажів, заснованої на райдшеринговому сервісі узгодженої організації ступеневих маршрутів для

залізничних систем у реальних умовах експлуатації - як без дотримання розкладу відправлення вантажних поїздів, так і за умов дотримання графіка руху. Автором уперше для формалізації процесу перевезень зернових вантажів із використанням погодженої організації ступеневих маршрутів за принципами райдшерингу в залізничних системах розроблено метод пошуку плану перевезень, що базується на математичній моделі у вигляді коаліцій у переважаних іграх з функціями вартості та розподілу потоків на мережі. Формалізовану гру трансформовано в задачу нелінійної оптимізації, яку розв'язано з використанням генетичного алгоритму. У межах фітнес-функції цього алгоритму застосовано штучну нейронну мережу як математичну модель нелінійної регресії, засновану на макроаналізі мережевого ефекту, що дає змогу відтворити взаємозалежність руху поїздопотоків на маршрутах переважаного полігону. Такий підхід уперше забезпечив достатню точність і швидкість моделювання поведінкових механізмів, які виникають у залізничній системі під час впровадження райдшерингового сервісу перевезень зернових вантажів. Для дослідження впливу удосконалення процесу залізничних перевезень зерна на функціонування залізничної системи розроблено метод оцінювання рівня відсутності координації, що ґрунтується на обчисленні показника ціни анархії (англ. The price of anarchy, PoA) за різними сценаріями перевезень зернових вантажів. У разі функціонування залізничної системи України за чинною моделлю перевезень у період "високого сезону" ціна анархії становить 1,0605, що свідчить про можливість підвищення ефективності системи на 6,05% за умови впровадження принципів райдшерингу. Отримані результати дозволили теоретично обґрунтувати значущість координації для прискорення перевезень та збільшення пропускної спроможності залізничної мережі. Виявлено поведінковий механізм, здатний стимулювати вантажовідправників до формування ступеневих маршрутів, що базується на координації в межах єдиного інформаційного середовища та організації подачі під маршрутні групи поїзного локомотива згідно з попередньо узгодженим графіком руху.

Удосконалено комплекс функціональних завдань системи АСК ВП УЗ-Є шляхом формування вимог до цифрової платформи-агрегатора, призначеної для координації дій вантажовідправників і перевізника відповідно до принципів райдшерингу. Запропонована платформа сприятиме об'єднанню вагонних відправок у ступеневі маршрути за рахунок консолідації партій зерна від різних відправників, які мають намір здійснити перевезення у близькі календарні періоди, що, своєю чергою, відкриває можливість бронювання місця у ступеневому маршруті. Такий підхід дозволить прискорити рух зернових відправок і підвищити ефективність використання обмеженої пропускної спроможності залізничної мережі.

Практичні результати дослідження полягають у вирішенні прикладного завдання автоматизації пошуку плану залізничних перевезень зернових вантажів, що ґрунтується на погодженій організації ступеневих маршрутів за принципами райдшерингу. Завдяки застосуванню методу побудови штучної нейронної мережі як математичної моделі нелінійної регресії вдалося формалізувати взаємозалежності між потоками поїздів у межах перевантаженого полігону залізничної мережі. Це дало змогу кількісно оцінити вплив інтенсивності руху на окремих ділянках на тривалість проходження маршрутів у зоні підвищеного навантаження.

Отриманий науковий результат у вигляді математичної моделі райдшерингового сервісу залізничних перевезень зернових вантажів має як теоретичну, так і прикладну цінність. Проведене моделювання та виявлені залежності підтвердили адекватність побудованої моделі та довели позитивний вплив впровадження райдшерингового підходу з урахуванням графіка руху на підвищення ефективності функціонування залізничної системи. З прикладної точки зору виявлено поведінковий механізм, що реалізується в залізничній системі, а також акцентовано увагу на важливості включення стимулів для вантажовідправників у нові сервісні продукти з організації зернових перевезень за моделлю райдшерингу. Одним із таких стимулів може бути надання виділеного вільного слоту часу для руху, що сприятиме пришвидшенню

перевезень порівняно зі звичайною практикою. Таким чином, прикладна цінність отриманого автором наукового результату полягає у можливості вдосконалення зернової логістики на залізниці шляхом впровадження райдшерингового сервісу.

Теоретико-ігровий підхід (англ. game-theoretic approach) - це розділ прикладної математики, що використовує ідеї теорії ігор для аналізу взаємодії між автономними агентами (учасниками), які приймають рішення з урахуванням поведінки інших. У транспортних задачах ці агенти можуть бути перевізники, пасажери, водії, вантажовідправники, диспетчери тощо.

Основна ідея застосування полягає в тому, що кожен учасник транспортної системи має власну мету (наприклад, мінімізацію витрат, часу чи підвищення прибутку), і його рішення впливає на інших. Теоретико-ігровий підхід дозволяє моделювати конфлікти інтересів і взаємозалежність рішень.

Такий підхід може застосовуватися для рішення різних задач в транспорті.

1. Автомобільний транспорт: ціна анархії (Price of Anarchy) - оцінка втрат ефективності в результаті егоїстичної поведінки учасників (водіїв), наприклад у виборі маршруту; моделі паркування - аналіз вибору місць паркування, де водії конкурують за обмежені ресурси; динамічне ціноутворення на платних дорогах - оптимізація тарифів для регулювання трафіку.

2. Залізничний транспорт: коаліційні ігри - координація між вантажовідправниками для формування спільних маршрутів (наприклад, ступеневих); ігри з перевантаженням - моделювання ситуацій, коли маршрути перевантажуються через інтенсивне використання, як у задачах капаситованих графів; розподіл слотів руху - конкуренція між перевізниками за обмежені часові вікна на інфраструктурі.

3. Авіаційний транспорт: аукціони слотів - розподіл злітно-посадкових слотів між авіакомпаніями на конкурентних засадах; багатоагентні моделі

стратегічного планування - взаємодія між авіакомпаніями, аеропортами та диспетчерськими службами.

4. Морський транспорт: кооперативні ігри - об'єднання судновласників у коаліції для ефективнішого завантаження суден; ігри розкладу швартування - конфлікти за ресурси портів (причали, крани, буксири тощо).

Можуть бути використані різні класи ігор, зокрема некооперативні ігри - кожен гравець діє самостійно (пошук рівноваги Неша); кооперативні ігри - дозволяється об'єднання учасників у коаліції; ігри з перевантаженням (congestion games) - ефективність зменшується з ростом числа користувачів на маршруті; стохастичні ігри - урахування випадкових факторів (наприклад, погодних умов, поломок); еволюційні ігри - аналіз того, як стратегія змінюється з часом унаслідок навчання або адаптації.

Так, автори статті [12] розробили математичну модель сервісу спільного перевезення зернових вантажів залізницею у вигляді коаліцій у іграх з перевантаженням. У цій статті розглядається моделювання перевезень зернових вантажів на залізниці за принципами райдшерингу. Автори пропонують формалізувати процес у вигляді коаліцій у іграх з перевантаженням, що дозволяє врахувати взаємозалежності руху поїздопотоків у перевантаженому полігоні мережі.

В рамках дослідження було проведено математичне моделювання сервісу райдшерингу залізничних перевезень зернових вантажів. Було доведено адекватність математичної моделі. Встановлено, що дотримання графіка руху призводить до збільшення непродуктивного простою залізничних вагонів після завантаження, що знижує стимули для формування коаліцій вантажовідправниками. Однак, згідно з результатами моделювання, за умов руху за графіком, враховуючи координацію вантажовідправників та перевізника, показники перевезень значно покращуються. Це стимулює вантажовідправників до формування коаліцій. Було виявлено, що середня тривалість перевезення вантажів зменшилася на 14,9 % від показника за сценарієм поточної транспортної моделі – без дотримання графіка.

Особливістю результатів у рамках дослідження є те, що запропонована математична модель дозволяє адекватно моделювати сервіс райдшерінгових перевезень зерна в залізничній системі. Галуззю практичного застосування результатів є залізнична галузь. Умовами практичного застосування результатів дослідження є важливість впровадження цифрових платформ агрегаторів для координації вантажовідправників та перевізників.

Ще один приклад застосування теоретико-ігрового підходу для залізничного транспорту запропоновано у роботі [13]. Автори зазначають, що впродовж останніх десятиліть багато країн запровадили структуру управління вертикальним розділенням у галузі залізничних вантажних перевезень. Згідно з цією структурою управління, менеджер інфраструктури, який може бути незалежною компанією або державною установою, продає маршрути поїздів компаніям-операторам вантажних перевезень. Після придбання маршрутів компанія-оператор матиме право запускати поїзди за визначеними шляхами у визначений час і, таким чином, може надавати транспортні послуги вантажовідправникам. У процесі менеджера інфраструктури необхідно визначити перелік цін на свої маршрути поїздів; а компанія-оператор має визначити, які маршрути поїздів придбати для задоволення невизначених потреб клієнтів на основі прайс-листа компанії-оператора. У цьому дослідженні взаємодія між менеджером інфраструктури та компаніями-операторами розглядається авторами як мережева гра Штакельберга. Дане дослідження спочатку формулює дворівневу модель оптимізації для визначення рівноважних цін, які компанія-оператор стягуватиме, щоб максимізувати власний прибуток в односторонньому порядку без співпраці. Для вирішення дворівневої моделі було розроблено метод, що включає градієнтний та локальний пошук. Також пропонується обернена модель оптимізації для визначення цін, що призводять до глобальної оптимальності. Для розв'язання моделі оберненої оптимізації розроблено алгоритм на основі площини сікання Фенхеля. Для гри розроблено контракт на субсидування, щоб координувати рішення гравців. Для визначення оптимальної ставки субсидії розроблено метод двошарового градієнтного

пошуку. Для перевірки моделей та алгоритмів наведено числові випадки, засновані на даних галузі залізничних вантажних перевезень Великої Британії.

Також існують дослідження, засновані на застосуванні теоретико-ігрового підходу для автомобільного виду транспорту, зокрема, стаття авторів [14] пропонує динамічну стратегію ціноутворення для паркувальних місць, що базується на теорії ігор. Запропонована багатоступенева модель гри на основі динамічного ціноутворення для паркувальних місць з метою контролю заторів враховує взаємодію між водіями та управлінням паркуванням, спрямовану на зменшення заторів та оптимізацію доходів.

Автори проводять дослідження та роблять висновки про те, що кількість транспортних засобів постійно зростає, особливо в містах. Однак кількість паркувальних місць залишається майже постійною через обмежені ресурси, такі як земля, відсутність належного управління та зростання населення. Водії деякий час шукають вільне місце для паркування. Це призводить до втрати часу, енергії та природних ресурсів, таких як паливо, а також до забруднення. Багато міст впровадили розумні системи паркування, такі як автоматизовані системи паркування, для паркування автомобілів на багаторівневих парковках, використовуючи простір інтелектуальним способом. Деякі міста використовують Інтернет речей (IoT) для виявлення та надсилання інформації про вільні паркувальні місця водіям за допомогою датчиків. Попередні дослідження в цій галузі були зосереджені переважно на різних методах прогнозування для прогнозування зайнятості паркувальних місць у різні часові інтервали. Ці прогнози можуть допомогти водіям знайти вільні паркувальні місця, уникаючи необхідності подорожувати, щоб знайти їх. Водії зазвичай віддають перевагу вуличним парковкам, ніж позавуличним, оскільки вуличні парковки дешевші та ближчі. Вони шукають вуличне паркувальне місце, хоча інтелектуальна система паркування повідомляє про вільне місце на позавуличній парковці. Це призводить до заторів поблизу вуличних парковок. Багаторівневі системи паркування або методи прогнозування самі по собі не можуть вирішити проблеми з паркуванням, доки попит не буде належним

чином керований. Правильний розподіл транспортних засобів, які шукають паркувальні місця, між усіма доступними паркувальним майданчиками (на вулиці та поза вулицею), вирішує проблему заторів поблизу вуличних паркувальних майданчиків у години пік та втрати доходів, з якими стикаються позавуличні паркувальні майданчики.

Автори зазначають, що одним із способів управління попитом є використання динамічного ціноутворення. Зростання цін на вуличні парковки в години пік може змусити деяких водіїв звернути увагу на позавуличні парковки, якщо вартість позавуличного паркувального місця та вартість проїзду до паркувального місця (загальна вартість паркування) нижчі за вартість вуличного паркувального місця. Таким чином, рух транспорту можна розподілити між вуличними та позавуличними парковками. Навіть якщо зайнятість вуличних парковок зменшиться в години пік, їх дохід може збільшитися завдяки збільшенню цін у ці години. Зростання цін може вплинути не на всіх водіїв. Деякі водії можуть не віддати перевагу їзді на дальшу парковку та все ще можуть захотіти паркуватися на ближчій, незважаючи на зростання цін. Однак більшість водіїв віддають перевагу їзді на позавуличну парковку, щоб зменшити загальну вартість паркування; це може допомогти підвищити рівень зайнятості, а також дохід позавуличних парковок. Багато дослідників запропонували стратегії динамічного ціноутворення, де динамічні ціни для різних часових інтервалів розраховуються за допомогою теорії ігор. Теорія ігор – це вивчення різних способів, за допомогою яких економічні агенти роблять інтерактивний вибір для досягнення результатів (які можуть не бути заплановані окремими агентами) з урахуванням уподобань цих агентів.

Тому автори пропонують застосувати стратегію динамічного ціноутворення на основі теорії ігор, яка має на меті оптимізувати вигоди як для управління паркуванням автомобілів, так і для водіїв. Мета полягає в тому, щоб знайти рівноважну ціну Неша для годин пік та позапікових годин, де дохід управління паркуванням автомобілів максимізується, а ціна, яку сплачують водії, мінімізується. Результати моделювання показують, що запропонована

модель дозволяє зменшити затори в години пік, а прибутки власників паркувальних майданчиків збільшуються.

Застосування теоретико-ігрового підходу для міського вантажного транспорту висвітлено у статті [15]. Автори зазначають, що міські вантажні перевезення, які іноді також називають міською логістикою, мають на меті зменшення негативних зовнішніх ефектів, таких як викиди, шум та затори, пов'язаних з вантажною діяльністю, одночасно підтримуючи їх економічний та соціальний розвиток. Сьогодні ця проблема є ще більш важливою та складною зі зростанням кількості приватних транспортних засобів, зростаючим попитом на послуги міських вантажних перевезень та зростаючим визнанням необхідності зміни парадигми в бік екологічно сталої логістики та вантажних технологій.

Міські вантажні перевезення привернули багато дослідницьких зусиль протягом останніх десятиліть з різних точок зору, включаючи регулювання транспорту, оцінку та скорочення викидів, планування транспорту тощо. Більшість досліджень щодо планування міських вантажних перевезень моделювали проблему на основі структури задачі маршрутизації транспортних засобів з метою мінімізації загальних витрат/затримок для перевізників або транспортних компаній, одночасно задовольняючи обмеження попиту та споживання. Ці дослідження в основному зосереджені на моделюванні вантажної діяльності. Однак особисті перевезення та їх вплив на планування вантажних перевезень недостатньо вивчені.

Щоб заповнити вищезгадану прогалину, автори пропонують динамічну теоретико-ігрову модель для планування міських вантажних перевезень, яка здатна характеризувати взаємодію між вантажним та особистим транспортом. Зокрема, задача формулюється як динамічна математична програма з рівноважними обмеженнями, яка може обробляти динамічний розподіл руху неоднорідних учасників дорожнього руху. Обговорюються теоретичні властивості цієї нової моделі. Для досягнення зручності та гарантії якості рішення отримано математичну програму з переформулюванням обмежень

взаємодоповнюваності. Проблему, зрештою, можна вирішити за допомогою запропонованого алгоритму проектного градієнта. Числові результати показують, що взаємодія вантажного та особистого транспорту не є незначною для транспортної компанії.

Крім того, за допомогою масштабних числових тестів автори виявляють парадокс, подібний до Браесовського, на основі запропонованої моделі, яка може надати управлінську інформацію організації з планування міста, для покращення соціального добробуту шляхом розробки відповідної політики.

Таким чином, можна зробити висновок, що попередніми науковими дослідженнями було приділено достатню увагу застосуванням теоретико-ігрового підходу для вирішення задач на різних видах транспорту та деякі аспекти можуть бути застосовані для удосконалення схем перевезення зернових вантажів залізничним транспортом.

3 Аналіз технології організації перевезень Транс'європейської транспортної мережі

3.1 Загальний аналіз Транс'європейської транспортної мережі

Транс'європейська транспортна мережа (Trans-European Transport Network, TEN-T) - це стратегічна ініціатива Європейського Союзу, спрямована на створення єдиного, інтегрованого, ефективного та сталого транспортного простору, що забезпечує безперервність перевезень усіма видами транспорту між країнами ЄС та їхніми сусідами. Структурно TEN-T охоплює два рівні: основну мережу (core network), яка повинна бути завершена до 2030 року, та всеохопну мережу (comprehensive network) - до 2050 року.

TEN-T об'єднує автомобільні, залізничні, внутрішні водні, морські та повітряні коридори, а також вузли мультимодальної логістики (термінали, порти, інтермодальні центри). Основна мета цієї мережі - усунення «вузьких місць», інтеграція нових членів ЄС, гармонізація технічних параметрів та підвищення мобільності й сталості перевезень.

Одним з ключових елементів TEN-T у північно-східному напрямку є коридор North Sea–Baltic, який охоплює країни Балтії, Польщу, Німеччину та країни Бенілюксу. У межах цього коридору реалізується проєкт Rail Baltica - високошвидкісна залізнична лінія європейського стандарту (1435 мм), яка з'єднає Таллінн, Ригу, Каунас, Варшаву і далі - з Берліном. Цей проєкт має стратегічне значення не лише для країн Балтії, а й для майбутньої інтеграції України в європейський транспортний простір.

У 2023–2024 роках Україна отримала статус країни-кандидата на приєднання до TEN-T, що відображено в оновленому регламенті ЄС (EU Regulation 2024/223). У документі передбачено інтеграцію України до чотирьох основних коридорів TEN-T, зокрема: Балтійсько-Чорноморсько-Егейського,

Рейнско-Дунайського, Східного/Середземноморського, а також розширення «Солідарних ліній» (Solidarity Lanes), запроваджених після 2022 року.

Залізнична інфраструктура України, попри суттєві пошкодження внаслідок війни, має високий потенціал інтеграції в TEN-T. Це зумовлено як геостратегічним розташуванням, так і наявністю широкої мережі колій, логістичних хабів та морських портів. Зокрема, напрямки Львів – Ковель – Ягодин – Польща, Київ – Кременчук – Ізмаїл, а також Ужгород – Чоп – Словаччина мають бути технічно адаптовані до вимог європейських стандартів.

Окреме місце в контексті TEN-T посідає технічна гармонізація, зокрема питання ширини колії (1435 мм проти 1520 мм), цифровізації управління рухом (ERTMS), стандартизації логістичних послуг та електрифікації маршрутів. Проекти зі створення двоколійних вагонів, вузлів трансшипменту та комбінованих терміналів є ключовими для підвищення пропускної здатності на стику української та європейської інфраструктури.

Таким чином, Транс'європейська транспортна мережа виступає не лише інструментом технічної інтеграції, але і стратегічною платформою для підвищення транспортної безпеки, сталого розвитку логістики та забезпечення зовнішньоекономічної стійкості України в умовах війни та післявоєнного відновлення. Інтеграція в TEN-T також відкриває нові можливості для українських вантажовідправників на ринках Балтії та Західної Європи.

3.2 Аналіз показників коридору North Sea – Baltic Corridor

RFC-8 (North Sea–Baltic Corridor) - це один із дев'яти визначених залізничних вантажних коридорів (Rail Freight Corridors, RFC) Європейського Союзу, створених для розвитку інтегрованої, ефективної та стійкої європейської транспортної системи. RFC-8 має стратегічне значення для логістики Північної, Центральної та Східної Європи, включаючи країни Балтії,

і відіграє дедалі важливішу роль для України в умовах переорієнтації експортно-імпортних потоків.

Основні характеристики RFC-8.

Повна назва: North Sea–Baltic Corridor. Стартова точка: Порти Бельгії та Нідерландів (Антверпен, Роттердам, Зебрюгге). Маршрут проходить через: Бельгію, Нідерланди, Німеччину, Польщу, Литву, Латвію, Естонію. Кінцева точка: Таллінн (Естонія) з виходом на проєкт Rail Baltica. Довжина: понад 5 000 км. Тип перевезень: вантажні поїзди, інтермодальні перевезення, контейнерні потоки. Схему коридору наведено на рисунку 3.1.

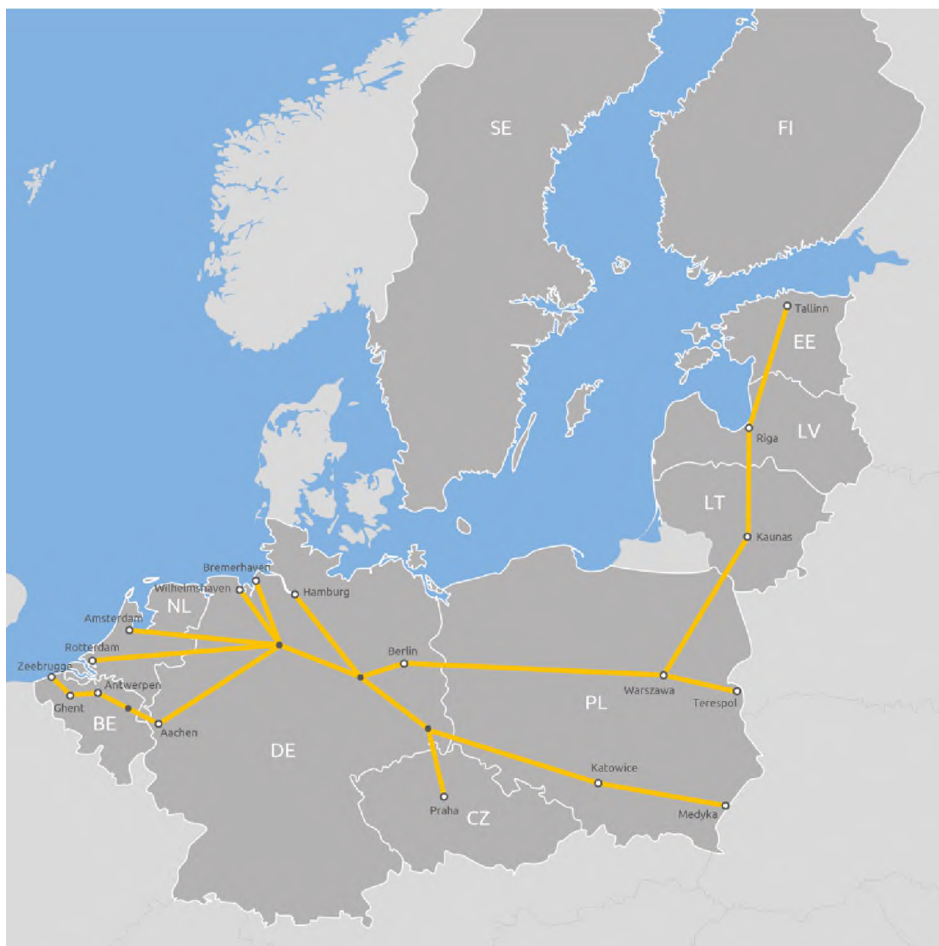


Рисунок 3.1- Коридор Rail Freight Corridor North Sea-Baltic [16]

Стратегічне розташування коридору на східному кордоні Європейського Союзу з виходом до східної Європи, Центральної Азії та за її межі дає йому ключову роль у координації зусиль, які сприяють розвитку залізничних

транспортних маршрутів, які є продовженням вже існуючої мережі з десяти коридорів. Залізничний вантажний коридор Північне море - Балтика - це місце зустрічі двох різних залізничних систем, і його учасники вже пропонують можливості та досвід у ефективній взаємодії між залізницями стандартної та широкої колії.

На рисунку 3.2 зображений графік загальної кількості поїздів, які використали коридор RFC-8.

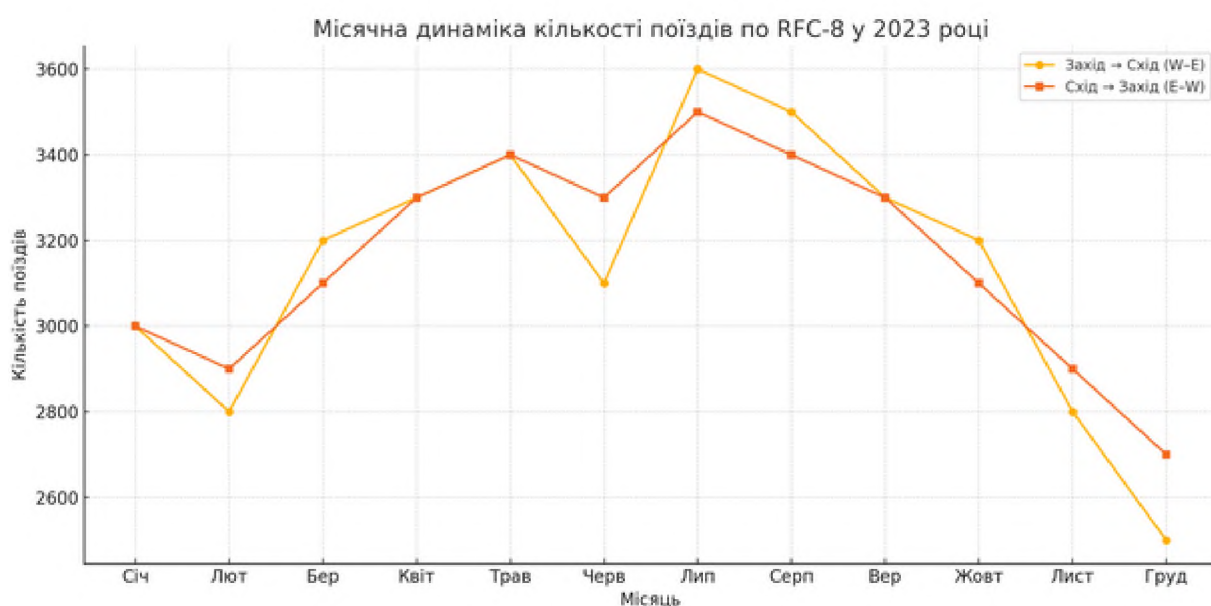


Рисунок 3.2 - Місячна динаміка кількості поїздів по RFC-8 у 2023 році

Загальна кількість поїздів, що перетнули кордон на RFC-8 у 2023 р.: 89 605, що на +4,1 % більше, ніж у 2022 (із +3 525 поїздів), місячна динаміка показує нестабільність із піками в липні ($\approx 3500\text{--}3600$ поїздів/місяць) і спадами до кінця року (2500–2800).

Видно позитивну динаміку – у 2023 загальна кількість поїздів на RFC-8 зросла на 4,1 %. Це підтверджує стабільний ріст інтеграції та логістичної активності, зокрема за рахунок збільшення потоку українських експортних вантажів через Польщу–Литву/Балтію

Також потрібно зауважити, що присутня сезонність обсягів – максимальне навантаження припало на літні місяці (червень–серпень), що пояснюється піком аграрного експорту та інтермодальної логістики в цей період.

Ще однією особливістю є зростання транскордонного руху – зокрема на Польща/Литва кордоні через збільшення транспортування українських вантажів, що позитивно вплинуло на загальні показники RFC-8 .

На рисунку 3.3 зображено динаміку руху поїздів на RFC-8 (North Sea–Baltic Corridor) у період з 2018 по 2023 рік.

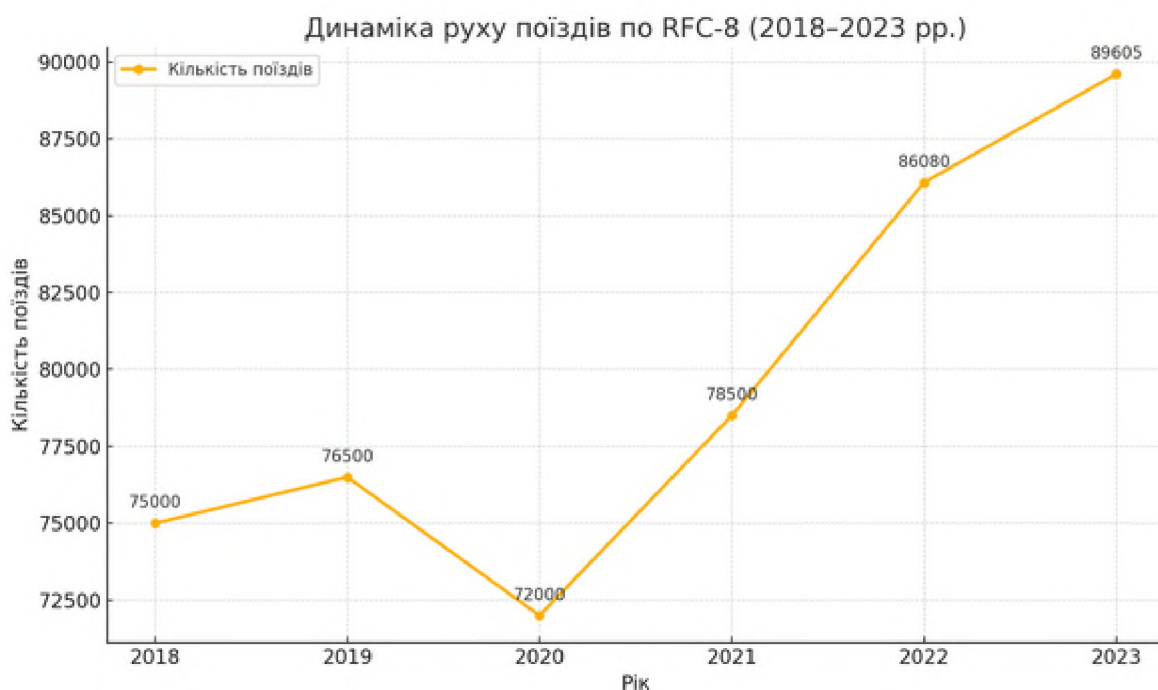


Рисунок 3.3. - Динаміка руху поїздів на RFC-8 (North Sea–Baltic Corridor) у період з 2018 по 2023 рік.

Спостерігається загальна тенденція зростання інтенсивності руху, особливо після 2021 року. У 2023 році кількість поїздів досягла рекордного рівня - 89 605, що на 4,1 % більше, ніж у 2022. Це зростання пов'язане зі змінами в європейських логістичних ланцюгах, зокрема через переорієнтацію українського експорту на балтійський і північноморський напрямки

Пунктуальність поїздів курсуючих коридором вимірюють коли поїзд потрапляє до першої точки, яка належить коридору, та останньої точки, яка йому належить. На графіках видно, що пунктуальність збільшилася в березні/квітні. Це спричинено збільшенню пропускної спроможності мережі через зменшення пасажирського та вантажного руху (рисунок 3.4)[17].

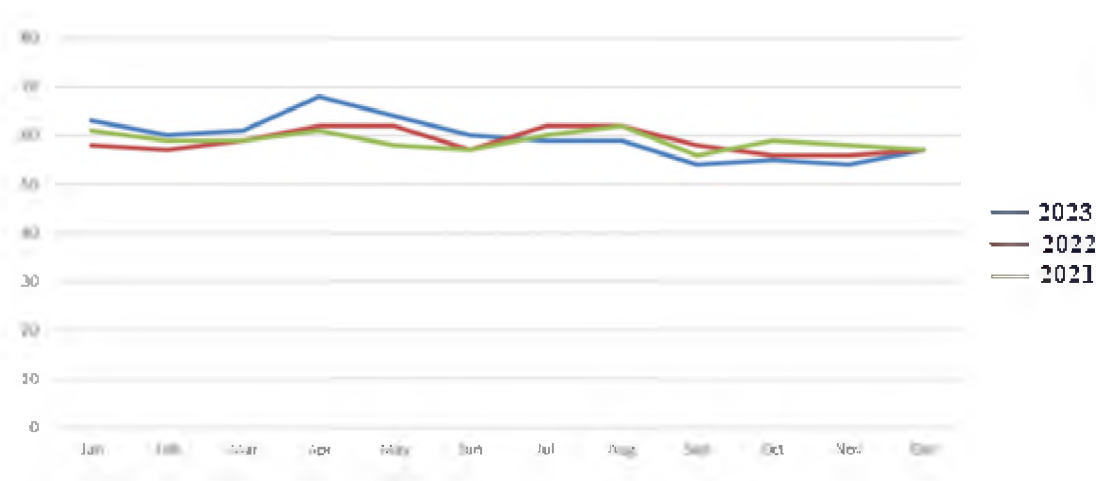


Рисунок 3.4 - Графік пунктуальності при відправці коридору Схід-Захід за 2021-2023 рр

З рисунку 3.4 видно, що середня пунктуальність при відправці Схід-Захід за три роки не змінилася та складає 59%.

З вищенаведеного можна зробити висновок, що RFC-8 продемонстрував ефективне нарощування транспортного потенціалу у 2023 році під впливом геополітичних змін і логістичних потреб Європи. Успішна інтеграція українських вантажопотоків через RFC-8 свідчить про потенціал подальшого розвитку мультимодальних маршрутів та підсилення співпраці з країнами Балтії.

4 Формалізація процедури вибору схеми перевезень зернових вантажів на основі гри з природою

Для реалізації завдання, яке поставлено у роботі потрібно розробити математичну модель, яка дозволить мінімізувати витрати. Для математичного представлення плану запропоновано розглядати статистичну гру.

Обрання нитки передбачає наявність ситуацій вибору найвигіднішого варіанту з кількох наявних варіантів за умов невизначеності [18]. І тут противником гравця, а гравцем виступатиме експедитор, є певна об'єктивна реальність, яку прийнято називати природою, яка об'єктивно не зацікавлена у програші експедитора. Термін "природа" в теорії ігор розуміється в широкому розумінні. Це може бути дійсні природні фізичні (кліматичні), біологічні, хімічні, соціальні тощо. процеси, що супроводжують економічну діяльність. Під "природою" може також розумітися ринок, що протистоїть підприємцю, конкуруюче середовище, монополія тощо. "Природа" може бути як антагоністична сторона, а може як кооперативне середовище [19]. "Природа" у вигляді природних процесів, як частина економіки, не прагнути "спеціально" нашкодити підприємцю, але вона зазнає певних збитків від його економічної діяльності і цей "програш" для неї повинен бути мінімальним, якщо, взагалі, без нього для навколишнього середовища не можна обійтися.

Задачу пошуку варіанта вивозу вантажу представлено у вигляді гри з природою, де гравець є логістом, який має п'ять стратегій, а під "природою" розуміється загальний вплив всіх можливих факторів на сценарії затримки вантажу в дорозі. Для пошуку змішаної стратегії гри задачу перетворено на задачу лінійного програмування.

Позначимо через $y_1, y_2, \dots, y_m \geq 0$ імовірності використання стратегій A1-A5, V- мінімаксна виграшна вартість гри (оптимальні втрати гравця).

Мета гравця – мінімізувати витрати незалежно від дії природи (тобто - знайти змішану стратегію, що гарантує найменші з найбільших втрат).

Оптимальну змішану стратегію гравця можна представити

$$Y^* = (y_1^*, y_2^*, \dots, y_m^*) \quad (4.1)$$

Цільову функцію процедури вибору схеми перевезень зернових вантажів можна представити :

$$V \rightarrow \min \quad (4.2)$$

З обмеженнями:

$$\begin{array}{ccccccc} a_{11}y_1 & + & a_{21}y_2 & + & \dots & + & a_{m1}y_m & \leq & V \\ a_{21}y_1 & + & a_{22}y_2 & + & \dots & + & a_{m2}y_m & \leq & V \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ a_{1n}y_1 & + & a_{2n}y_2 & + & \dots & + & a_{mn}y_m & \leq & V \end{array} \quad (4.3)$$

де $y_1, y_2, \dots, y_m$ - невід'ємні змінні;

$Y^* = (y_1^*, y_2^*, \dots, y_m^*)$ - вектор, який характеризує ймовірність застосування стратегій гравцем

$$y_1^* + y_2^* + \dots + y_m^* = 1 \quad (4.4.)$$

Виходячи з чотирьох варіантів маршруту розроблена платіжна матриця з п'ятьма стратегіями вивозу зернових вантажів та трьома сценаріями затримки – оптимістичний, середній та песимістичний.

Варіант 1: Залізничний маршрут №1 перехід Ягодин-Дорохуск (З1)

Варіант 2: Залізничний маршрут №2 перехід Мостиська ІІ-Медика (З2)

Варіант 3: Автомобільний маршрут №1 Гребенне-Рава-Руська (А1)

Варіант 4: Автомобільний маршрут №2 Корчова-Краківець (А2)

Період планування – один місяць.

Платіжну матрицю гри сформовано у таблиці 4.1.

Таблиця 4.1 – Платіжна матриця гри

Стратегія гравця – вибір схеми вивезення	Стратегія природи – сценарій ризику	B1 (0%) Оптимістичний	B2 (+5%) Середній ризик	B3 (+10%) Песимістичний
A1 — використання всіх 4 маршрутів пропорційно найнижчій вартості		101270	106333,5	111397
A2 — використання лише залізничних маршрутів (31 і 32)		104356	109573,8	114791,6
A3 — використання лише автомобільних маршрутів (A1 і A2)		101522	106598,1	111674,2
A4 — лише залізничний маршрут найменшої вартості 31		101908	106998,4	112097,8
A5 — комбінування: залізниця + авто (50/50) за найтефективнішими цінами		102939	108085,9	113232,9

$$V \rightarrow \min$$

$$\begin{cases} 101270y_1 + 104356y_2 + 101522y_3 + 101908y_4 + 102939y_5 \leq V \\ 106333.5y_1 + 109573.8y_2 + 106598.1y_3 + 106998.4y_4 + 108085.9y_5 \leq V \\ 111397y_1 + 114791.6y_2 + 111674.2y_3 + 112097.8y_4 + 113232.9y_5 \leq V \end{cases}$$

Проведемо розв'язок за допомогою симплекс-методу.

Мінімаксні витрати (v) = 111397.0 тис. грн

$$Y^* = (y_1^* = 1; y_2^* = 0; y_3^* = 0; y_4^* = 0; y_5^* = 0;)$$

Знайдено ймовірність 1 для стратегії A1 – використання всі чотирьох вибраних маршрутів пропорційно найнижчій вартості – авто та залізниця, 50 на 50. Ця стратегія гарантує максимальні витрати не вище 111 млн. грн у найгіршому сценарії затримок.

5 Розробка вимог щодо формування автоматизованої системи вибору схем перевезень зернових вантажів в міжнародному сполученні з використанням теоретико-ігрового підходу

5.1 Передумови створення автоматизованої системи вибору схем перевезень зернових вантажів

Сьогодні дуже актуальна тема цифрової трансформації та автоматизації процесів, які мають підвищити рівень автоматизованого обслуговування клієнтів. Процес планування та бронювання ниток не став виключенням.

Головною системою бронювання замовлень на АТ Укрзалізниця є автоматизована система АС МЕСПЛАН, яка дозволяє надавати залізниці місячне замовлення на перевезення вантажів. Замовлення потрібно оформляти окремо для кожної станції відправлення та номенклатури вантажу. Облік виконання плану перевезення в обліковій картці за кожним планом перевезення, які ведуть працівники станцій у одному або двох примірниках. Якщо складається два примірника, один знаходиться у відправника, а інший на станції. Також за домовленістю сторін можна вести облікові картки в електронному вигляді. Також однією з автоматизованих систем є АСК ВП УЗ-Є (Автоматизована система керування вантажними перевезеннями), яка дає можливість контролювати та слідкувати за місцезнаходженням локомотивів та локомотивних бригад, здійснювати оперативний контроль навантаження і вивантаження. Контролювати прослідування пасажирських поїздів та попереджати про поїзну роботу.

Недоліками автоматизованих систем АС МЕСПЛАН та АСКВП УЗ-Є – це те, що система розроблена за старими нормативними документами та старими технологіями, які сьогодні не підходять сучасному ринку. АС МЕСПЛАН не виконує функцію планування, а скоріше виконує функцію прийому заявок. Через це диспетчерський апарат повинен постійно

перепланувати рух вагонів, що призводить до невизначеності перевезень. Немає можливості відстежувати вагони, вантаж та тривалість слідування маршрутом.

Для цього потрібно проаналізувати автоматизовану систему The Path Coordination System (PCS), яка працює на латвійській залізниці. Це дозволить розробити вимоги та удосконалити процес планування та бронювання PaP ниток.

5.2 Аналіз системи замовлення і обробки заявок у коридорах RFC

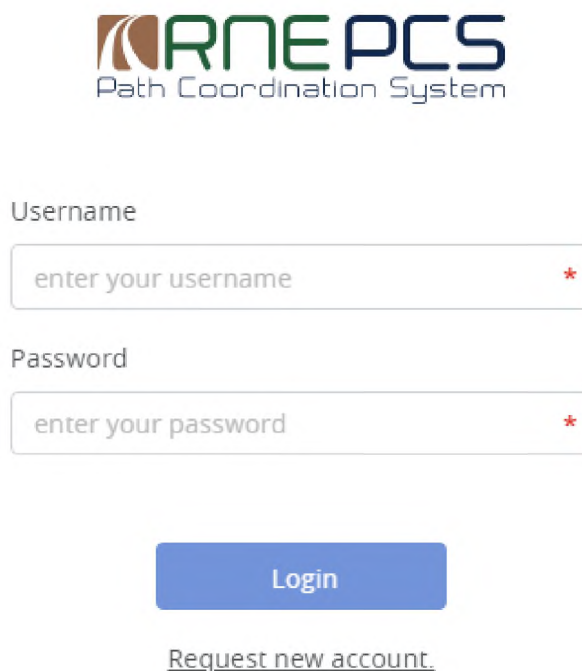
У коридора RFC мережі TEN-T діє автоматична система PCS, яка значно спрощує взаємодію диспетчерського апарату залізниці при здійсненні планування перевезень. PCS - це інтернет-додаток для обробки запитів на міжнародні шляхи, наданий RailNetEurope (RNE). PCS є обов'язковим інструментом для всіх запитів PaP та резервної пропускної спроможності. Доступ до інструменту є безкоштовним і надається всім заявникам, які мають дійсну підписану угоду користувача PCS з RNE. Щоб отримати доступ до інструменту, заявники мають надіслати запит до RNE.

Послуга (англ., Pre-arranged pat) - це міжнародна заздалегідь побудована нитка каталогу, що заснована на стандартних параметрах залізничного вантажного перевезення, і пропонується коридором OSS на основі статей 13 та 14 Регламенту ЄС 913/2010. Буває два види PaP послуг – це Fix-PaP та Flex PaP [17].

Fix-PaP-це PaP з фіксованими у замовленні часом відправлення, прибуття та перетину кордону. А Flex PaP – PaP з визначеним діапазоном гнучких даних, наприклад: часом відправлення, прибуття та перетину кордону. Flex PaPs дозволяє заявникам коригувати дані в PaP і подавати запит відповідно до своїх потреб. Каталог PaP публікується в середині січня кожного року для наступного розкладу мережі (за 11 місяців до зміни розкладу). PaP

відображається в IT-Tool PCS RNE, а каталог PaP також опублікований на веб-сайті RFC North Sea-Baltic [17].

Для роботи в автоматизованій системі потрібно зареєструватись в системі. Для цього необхідно відправити запит до RNE, після чого ввести свій особистий логін та пароль, який був надісланий на пошту (рис. 5.1).



The image shows the login interface for the RNE PCS Path Coordination System. At the top, the logo consists of a stylized 'R' in a brown square followed by the text 'RNE PCS' in green and blue, with 'Path Coordination System' in smaller blue text below it. Below the logo, there are two input fields. The first is labeled 'Username' and contains the placeholder text 'enter your username' with a red asterisk on the right. The second is labeled 'Password' and contains the placeholder text 'enter your password' with a red asterisk on the right. Below these fields is a blue rectangular button with the text 'Login' in white. At the bottom, there is a blue underlined link that reads 'Request new account.'

Рисунок 5.1 – Інтерфейс входу в автоматизовану систему PCS

На другому етапі завдяки розділу «PaP search» переходимо на сторінку пошуку. Завдяки фільтрам можна відсортувати нитки по напрямку, типу, коридору та знайти потрібну нитку (рис. 5.2).

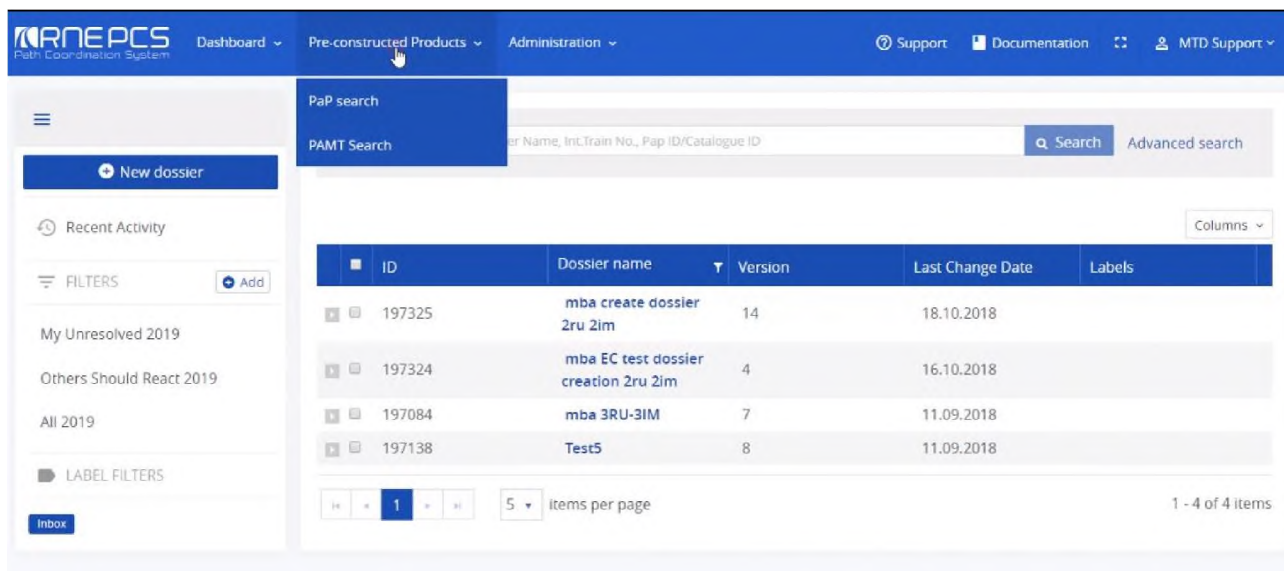


Рисунок 5.2 – Інтерфейс головної сторінки системи PCS

Після пошуку з'являється список доступних ниток, які також можна відсортувати по датам, типу, ID, станції відправлення та прибуття. Також зазначений час відправлення та прибуття (рис. 5.3).

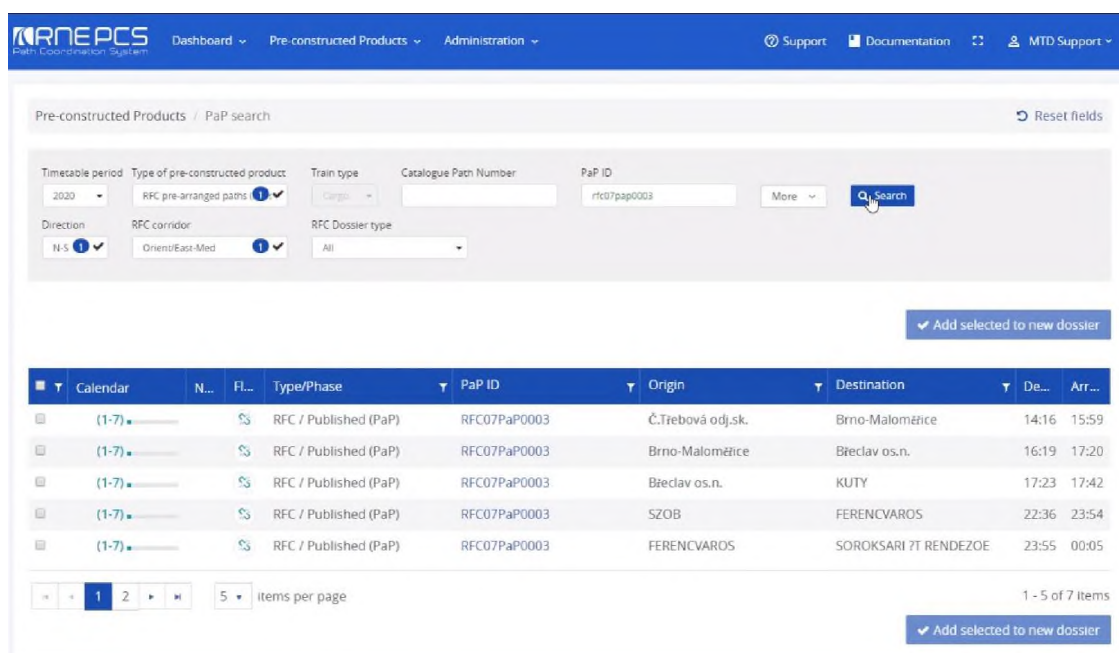


Рисунок 5.3 – Інтерфейс сторінки пошуку та відсортування за допомогою фільтрів у системі PCS

Наступним кроком буде створення нового досьє, що проходить у 7 етапів:

1. Reorder PaPs
2. Applicant path -
3. Dossier-level data
4. Train parameters
5. Calendar preferences
6. Path variants preview
7. Basic dataї

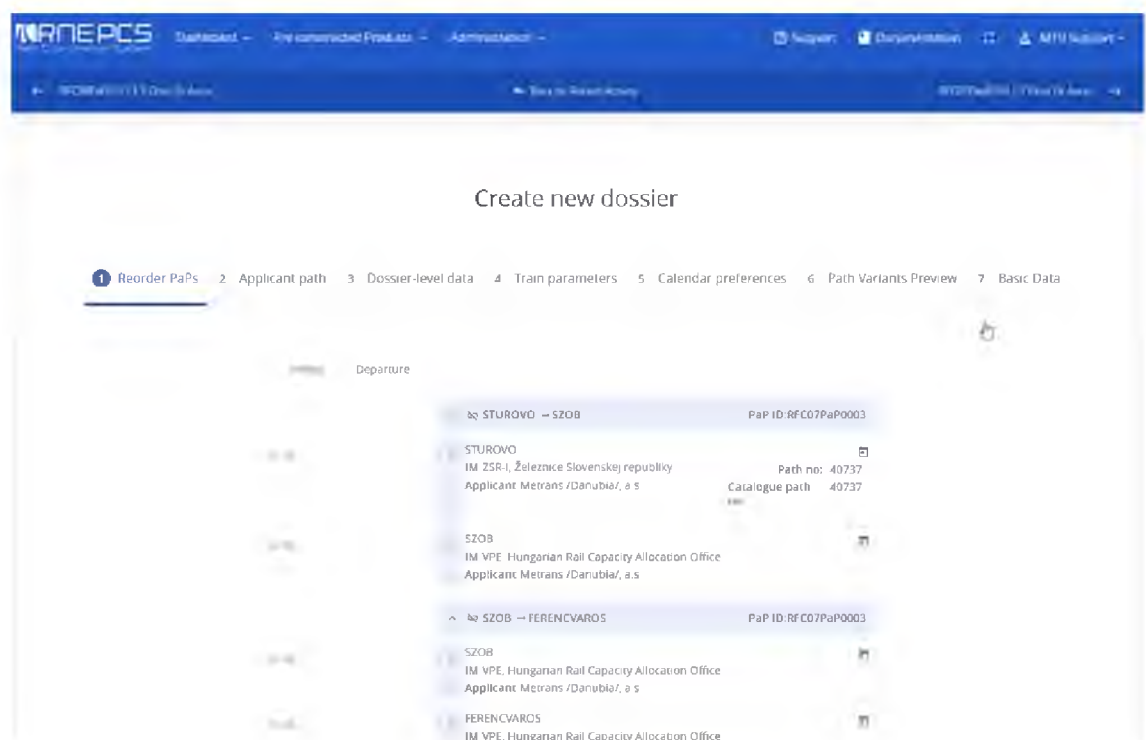


Рисунок 5.4 – Інтерфейс етапів створення досьє в системі PCS

Після закінчення заповнення всіх необхідних етапів, заявка подається на розгляд, можна змінювати дані та корегувати графік. Це буде продовжуватись до тих пір, поки обидва боки не досягнуть гармонізації (рис. 5.5).

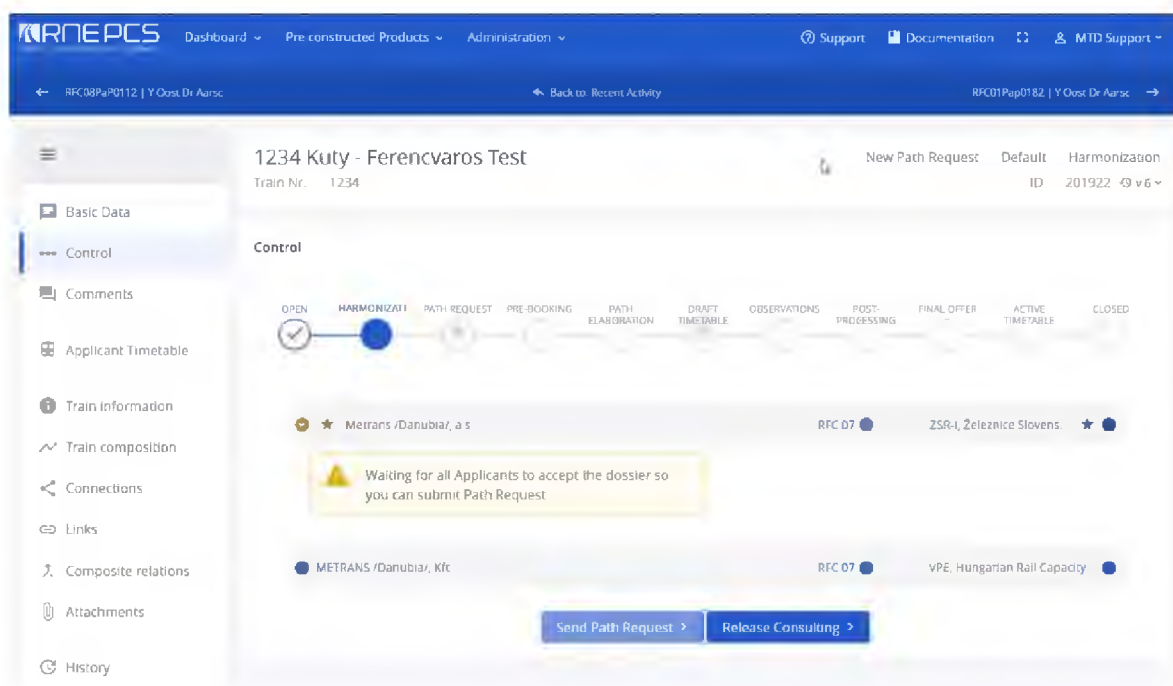


Рисунок 5.5 – Інтерфейс відкритого дос'є, який знаходиться на етапі гармонізації.

Можна зробити висновок, що автоматизована система PCS є більш досконалою, ніж автоматизовані системи, які діють в АТ Укрзалізниця. Для реалізації розробленої математичної моделі пропонується розробити вимоги до автоматизованої системи, яка матиме подібні функції бронювання схем перевезення у мережі АТ Укрзалізниця.

5.3 Розробка вимог до автоматизованої системи вибору схем перевезень зернових вантажів в міжнародному сполученні

Автоматизована система вибору схем перевезень зернових вантажів в міжнародному сполученні повинна забезпечувати збір та обробку даних. Зокрема, можна виділити автоматизований та ручний підхід. Автоматизований збір даних повинен автоматично збирати дані з різних джерел, таких як датчики на коліях, системи управління рухом, бази даних розкладів поїздів та інші інформаційні системи. В той час як ручний ввід даних необхідний для можливості введення даних вручну для випадків, коли автоматичний збір неможливий або потрібні додаткові відомості.

Обробка даних повинна проводитися з забезпеченням очищення даних з функцією видалення або корекції некоректних, неповних або дубльованих записів. Повинна забезпечувати трансформацію даних з перетворенням зібраних даних у формат, зручний для подальшого аналізу та моделювання. Агрегація даних повинна мати функцію об'єднання даних з різних джерел для створення єдиного набору інформації, а також мати інтеграцію з базами даних, забезпечуючи підключення до існуючих баз даних з безперебійним обміном даними з поточними інформаційними системами залізничної інфраструктури.

Налаштування параметрів моделей повинно бути забезпечено можливістю встановлення та коригування параметрів, таких як швидкість поїздів, інтервали між поїздами, технічні характеристики колій тощо.

Автоматизована система вибору схем перевезень зернових вантажів в міжнародному сполученні повинна передбачати симуляцію сценаріїв, зокрема створення сценаріїв з можливістю створення різних сценаріїв навантаження, включаючи пікові та непікові періоди та тестуванням впливу змін з аналізом впливу змін параметрів (наприклад, збільшення кількості поїздів або зміна графіку руху) на пропускну здатність.

Для візуалізації результатів моделювання системи підтримки прийняття рішень необхідне графічне представлення з відображенням результатів моделювання у вигляді графіків, діаграм, карт та інших візуальних елементів для полегшення аналізу та застосуванням інтерактивних інструментів з

можливістю взаємодії з моделями в реальному часі для кращого розуміння результатів.

Автоматизована система вибору схем перевезень зернових вантажів в міжнародному сполученні повинна мати функцію прогнозування завантаженості залізничних дільниць в короткостроковому до довгостроковому періодах. Так, короткострокове прогнозування передбачає створення прогнозного навантаження на дільниці та напрямки на найближчий період (години, дні), а довгострокове прогнозування передбачає створення прогнозного навантаження на місяці та роки вперед для стратегічного планування.

Для виявлення потенційних вузьких місць в системі підтримки прийняття рішень необхідно передбачити модуль аналізу поточних даних з виявленням ділянок з підвищеним навантаженням, де ймовірно виникнення перевантажень та модуль моделювання майбутніх навантажень, де проводиться оцінка впливу майбутніх змін (наприклад, відкриття нових маршрутів) на пропускну здатність.

Для візуалізації даних необхідно передбачити створення інтерактивних дашбордів, що відображають ключові показники пропускну здатності; географічних карт з відображенням інформації для кращого розуміння розподілу навантаження; сценарне планування для оцінки альтернативних рішень з аналізом різних варіантів рішень та їх впливу на пропускну спроможність. Ескіз інтерфейсу системи підтримки прийняття рішень у взаємодії з системою координації маршрутів для пошуку та планування маршрутів руху вантажних поїздів наведено на рисунку 5.6.

6 Техніко-економічне обґрунтування від впровадження удосконаленої схеми перевезень зернових вантажів з використанням теоретико-ігрового підходу в межах залізничного коридору Україна-країни Балтії

Перспективність використання змішаних перевезень є одним з найважливіших напрямків розвитку зовнішньоекономічних стосунків України з європейськими країнами-партнерами. Для забезпечення конкурентоспроможності залізничного транспорту на ринку вантажних перевезень в даній роботі ми пропонуємо впровадження залізничного маршруту наряду з автомобільним маршрутом перевезення вантажу..

Для відображення доцільності впровадження змішаного маршруту пропонується стратегія перевезення зернових вантажів на маршруті Житомир – Каунас з використанням всі чотирьох вибраних маршрутів пропорційно найнижчій вартості та використання залізниці та автомобілей (50/50) за найефективнішими цінами. Використовуються наступні маршрути:

Варіант 1: Залізничний маршрут №1 перехід Ягодин-Дорохуск (31)

Варіант 2: Залізничний маршрут №2 перехід Мостиська ІІ-Медика (32)

Варіант 3: Автомобільний маршрут №1 Гребенне-Рава-Руська (А1)

Варіант 4: Автомобільний маршрут №2 Корчова-Краківець (А2)

Головним критерієм економічної доцільності впровадження інноваційного проекту є оцінка його економічної ефективності. Вона характеризує абсолютну величину перевищення вартісної оцінки очікуваних (фактичних) результатів над сумарними витратами за певний період .

Розрахунок економічного ефекту полягає у різниці між результатами проекту та витратами на їх досягнення з урахуванням змін вартості протягом часу реалізації проекту та можливими ризиками.

Сумарний економічний ефект від реалізації заходів за певний розрахунковий період $T(E_T)$ обчислюється за формулою

$$E_T = P_T - B_T, \quad (6.1)$$

де P_T - вартісна оцінка витрат від здійснення заходів за розрахунковий період, грн.;

B_T - вартісна оцінка витрат на здійснення заходів за розрахунковий період, грн.

Необхідність приведення результатів і витрат різних років до розрахункового року пояснюється тим, що номінально однакова сума грошей, отримана в різні роки, має різну вартість.

Приведення результатів і витрат економічного ефекту різних років розрахункового періоду до останнього року здійснюється шляхом множення їх величини за кожний рік на коефіцієнт приведення α_t , що визначається для кожного року розрахункового періоду за формулою

$$\alpha_t^K = (1 + E_H)^{t_p - t}, \quad (6.2)$$

де α_t^K - коефіцієнт приведення результатів і витрат (ефекту) року t життєвого циклу проекту до останнього року розрахункового періоду.

E_H - річний норматив приведення результатів і витрат різних років до розрахункового року;

t_p - порядковий номер останнього року розрахункового періоду;

t - порядковий номер року t життєвого циклу проекту, що приводиться до розрахункового (останнього) року.

На величину економічного ефекту впливає рівень інфляції та ступінь можливого ризику його здійснення. Його врахування здійснюється шляхом

корегування коефіцієнтів приведення на величину інфляційного очікування і ступінь можливого ризику. Тоді формула (6.2) набуває вигляду

$$\alpha_t^K = \left(\frac{1 + E_H}{1 + I + R} \right)^{t_p - t}, \quad (6.3)$$

де E_H - середня річна ставка комерційних банків за депозитними внесками (дисконтна ставка), в частках одиниці, $E_H = 7\%$;

I - очікуваний середньорічний темп інфляції протягом життєвого циклу проекту в частках одиниці $I = 5\%$;

R - ставка, що враховує ступінь ризику здійснення проекту в частках одиниці. При високому ступені ризику ставка приймається в розмірі від 0,04 до 0,06; при середньому ступені ризику від 0,01 до 0,03; при відсутності ризику – 0.

Прогнозування - передбачення, яке засноване на врахуванні різних факторів, що дозволяють описати розвиток об'єкту.

Для встановлення прогнозних даних в даній роботі використовуються формалізовані методи, а саме метод прогновної екстраполяції. Він полягає у математичному описі розвитку об'єкта на основі наявних статистичних даних за минулий період.

6.1 Визначення економічного ефекту від впровадження нового маршруту перевезень

Здійснення проекту передбачається почати в 2024 р.

Виходячи з цього, передбачаються такі витрати, пов'язані з впровадженням залізничного маршруту перевезення:

- капітальні витрати на комп'ютерну програму – 600000 грн;

- науково-дослідна робота – 400000 грн;
- обсяги перевезення автомобільним транспортом – 10400 т/міс.

Розрахунок річних витрат:

- витрати на перевезення до впровадження

$$119120 * 12 = 1429440 \text{ тис грн/рік};$$

- витрати на перевезення після впровадження

$$74380 * 12 = 892560 \text{ тис грн/рік};$$

Таблиця 6.1 – Вихідні дані для розрахунку порівняння варіантів в різних експлуатаційних умовах

Найменування показника	Значення показника	
	до впровадження	після впровадження
1	2	3
Обсяги перевезення, т/міс	10400	10400
Витрати на перевезення, тис грн	119120	74380

Коефіцієнт приведення результатів і витрат різних років до розрахункового року

$$\alpha_{2024} = \left[\frac{1 + 0,07}{1 + 0,05 + 0,01} \right]^4 = 1,04;$$

$$\alpha_{2025} = \left[\frac{1 + 0,07}{1 + 0,05 + 0,01} \right]^3 = 1,03;$$

$$\alpha_{2026} = \left[\frac{1 + 0,07}{1 + 0,05 + 0,01} \right]^2 = 1,02;$$

$$\alpha_{2027} = \left[\frac{1 + 0,07}{1 + 0,05 + 0,01} \right]^1 = 1,01;$$

$$\alpha_{2028} = \left[\frac{1 + 0,07}{1 + 0,055 + 0,01} \right]^0 = 1;$$

Результати розрахунків наведено в таблиці 6.2.

При впровадженні нового міжнародного маршруту відправлення вантажів на основі розподілу відправки залізничним шляхом і автомобільним шляхом в напрямку Україна-Литва за рахунок скорочення зменшення вартості перевезення економічний ефект з наростаючим підсумком складає 1,08 млрд грн. Термін окупності даного проєкту настане на перший рік впровадження.

Економічний ефект досягається на підставі впровадження нового міжнародного маршруту відправлення вантажів на основі розподілу відправки залізничним шляхом і автомобільним шляхом у міжнародному транспортному сполученні за рахунок вибору найбільш оптимальних раціональних маршрутів слідування з меншими витратами. Це дозволить підвищити конкурентоспроможність організації маршрутів у міжнародному транспортному коридорі і, як наслідок, підвищить привабливість залізничного транспорту на ринку вантажних перевезень між Україною та країнами Балтії, що дозволить відкрити можливості доставки вантажів на нові ринки збуту.

Таблиця 6.2 – Розрахунок економічного ефекту від впровадження нового маршруту перевезень

Найменування витрат	місяць	Рік				
		2024	2025	2026	2027	2028
1	2	3	4	5	6	7
Витрати до впровадження						
Обсяги перевезення, тонн:	10400					
автомобільний тр-т	10400	124800	124800	124800	124800	124800
Витрати на перевезення, тис грн	119120	1429440	1429440	1429440	1429440	1429440
Витрати після впровадження						
Капітальні витрати:						
НДР, тис грн.		400	0	0	0	0
комп. програма, тис грн.		600	0	0	0	0
Обсяги перевезення, тонн:	10400					
автомобільний тр-т	4000	48000	48000	48000	48000	48000
залізничний тр-т	6400	76800	76800	76800	76800	76800
Витрати на перевезення, тис грн	74380	892560	892560	892560	892560	892560
Загальні витрати, тис. грн		893560	892560	892560	892560	892560
Економічний ефект, тис грн.	-	535880	536880	536880	536880	536880
Коефіцієнт приведення витрат різних років до першого року розр. періоду з урахуванням інфляційного очікування	-	1,04	1,03	1,02	1,01	1
Економ.ефект з урахуванням коеф.привед., тис грн.	-	557315,2	552986,4	547618	542248,8	536880,00
Економ.ефект наростаючим підсумком, тис грн.	-	557315,2	1110302	1100604	1089866,40	1079128,80

Висновки

На основі проведеного аналізу умов функціонування залізничних систем України та країн Балтії та обсягів торгівлі між країнами зроблено висновки щодо важливості розвитку залізничних вантажних перевезень між країнами. Удосконалено складання графіка руху поїздів міжнародних залізничних транспортних маршрутів.

На основі проведеного аналізу технології організації перевезень Транс'європейської транспортної мережі TEN-T, зокрема роботи залізничного вантажного коридору Північне море- Балтика-Україна виявлено відсутність автоматизації вибору схем перевезень вантажів на маршруті Україна-країни Балтії.

Обґрунтовано, що одним із напрямків вирішення задачі підвищення ефективності перевезень вантажів у міжнародному сполученні є впровадження автоматизованої системи вибору схем перевезень зернових вантажів в міжнародному сполученні з використанням теоретико-ігрового підходу

Удосконалено процедуру вибору схеми перевезень зернових вантажів на основі математичної моделі “три з природою” з перетворення її до задачі лінійного програмування, що, на відміну від існуючих, дозволяє врахувати стратегії використання різних комбінацій маршрутів на залізничному та автомобільному транспорті, сценарії ризиків затримки при русі коридором TEN-T при заданих вхідних параметрах та обмеженнях. Проведені експериментальні розрахунки та отримані результати - запропоновано використання всі чотирьох вибраних маршрутів пропорційно найнижчій

вартості. Ця стратегія гарантує максимальні витрати не вище 111 млн. грн у найгіршому сценарії затримок.

При впровадженні знайденої схеми перевезення зернових вантажів економічний ефект з наростаючим підсумком складає 1,08 млрд грн. Термін окупності даного проєкту настане на перший рік впровадження.

Список використаних джерел

1. Дослідження системи перевезень пасажирів швидкісними і звичайними поїздами на основі методів аналізу складних мереж А. М. Киман, Д.Р.Хаченко, Г. О.Прохорченко, Б. Ю. Хлібишин, Е. Л. Акопян Збірник наукових праць Українського державного університету залізничного транспорту. 2025. № 212 С. 21-27.
2. Агробізнес України 2023–2024 : інфографіч. довід. – Київ, 2024. – 53 с.
3. World cereal production will reach record in 2024: 2,854 million tons URL:: <https://www.tridge.com/news/world-cereal-production-will-reach-record-in-wxgmmom> (дата звернення: 5 травня 2025 р.).
4. World – Cereals – Market Analysis, Forecast, Size, Trends and Insights // IndexBox.URL: <https://www.indexbox.io/blog/cereal-world-market-overview-2024-3/> (дата звернення: 5 травня 2025 р.).
5. Перевезення зернових вантажів скоротилось на 27% порівняно з лютим 2024 року – Agravery URL: <https://agrigator.com.ua/2025/02/25/perevezennia-zernovykh-vantazhiv-skorotylos-na-27-porivniano-z-liutym-2024-roku-agravery/> (дата звернення: 6 травня 2025 р.).
6. Сайт Укрпідфлот URL: <https://urf.ua/en/agricultural-cargo> (дата звернення: 6 травня 2025 р.).
7. Бауліна І., Богомазова І., Мішков В. Розробка моделі формування ступінчастих маршрутів із зерновими вантажами на залізницях України // Збірник наукових праць Українського державного університету залізничного транспорту. – 2019. – № 187. – С. 42–52.
8. Арсененко Д. В. Удосконалення організації перевезення зернових вантажів залізничними ступінчастими маршрутами // Збірник наукових праць Українського державного університету залізничного транспорту. – 2019. – Вип. 184. – С. 92–101.

9. Козаченко Д. М., Вернигора Р. В., Рустамов Р. С. Створення експортно-орієнтованої мережі зернових елеваторів в Україні // Наука та прогрес транспорту. – 2017. – № 2 (68). – С. 56–70.
10. Pavlenko O., Velykodnyi D. The choice of rational technology of delivery of grain cargoes in the containers in the international traffic // International Journal for Traffic and Transport Engineering. – 2017. – Vol. 7. – P. 164–176.
11. Кравченко М. Удосконалення процесу залізничних перевезень зернових вантажів на основі принципів райдшерингу : дис. ... канд. техн. наук. – Харків, 2023.
12. Kravchenko M., Prokhorchenko A., Zolotarov S. Mathematical model of a railroad grain cargo ridesharing service in the form of coalitions in congestion games // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. – 2023. – Vol. 5, № 3(125). – P. 35–48. – DOI: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2023.289470>.
13. European Journal of Operational Research. Network revenue management game in the railway industry: Stackelberg equilibrium, global optimality, and mechanism design / Dongjun Li, Dewan Md Zahurul, Mark Robinson, Dong-Ping Song, Jing-Xin Dong, Marc Reimann. – 2024. – Vol. 312, Issue 1. – P. 240–254.
14. Karri S., Dhabu M. M. Multistage game model based dynamic pricing for car parking slot to control congestion // Sustainability. – 2022. – Vol. 14, Issue 19. – 11808. – DOI: <https://doi.org/10.3390/su141911808>.
15. Zhang B., Yao T., Friesz T. L., Liu H. Urban freight transportation planning: A dynamic Stackelberg game-theoretic approach/ URL: <https://arxiv.org/abs/1211.3950> (дата звернення: 6 липня 2025 р.).
16. Rail Freight Corridor North Sea-Baltic URL: <https://rfc8.eu/> (дата звернення: 6 липня 2025 р.).
17. Pre-arranged Path (PaP) URL: <https://rfc8.eu/faqs/> (дата звернення: 6 липня 2025 р.).

18. Фон Нейман Дж., Моргенштерн О. Теория игр и экономическое поведение / Пер. с англ. под ред. Н. Н. Воробьева. – М. : Наука, 1970. – 707 с.
19. Дубров А. М., Лагоша Б. А., Хрусталеv Е. Ю. Моделирование рискованных ситуаций в экономике и бизнесе. – К. : Финансы и статистика, 2000. – 176 с.