

Український державний університет науки і технологій  
Міністерства освіти і науки України

Український державний університет науки і технологій  
Міністерства освіти і науки України

Кваліфікаційна наукова  
праця на правах рукопису

ХОМЕНКО ЮРІЙ ЛЕОНІДОВИЧ

УДК 656.2

**ДИСЕРТАЦІЯ**

**ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ТРАНСПОРТНО-ТЕХНОЛОГІЧНОЇ  
СИСТЕМИ ЕКСПОРТУ ЗЕРНОВИХ У ЗМІШАНОМУ АВТОМОБІЛЬНО-  
ЗАЛІЗНИЧНО-ВОДНОМУ СПОЛУЧЕННІ**

275 – Транспортні технології (за видами)

Подається на здобуття наукового ступеня доктора філософії

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

 Ю. Л. Хоменко

Науковий керівник

ОКОРОКОВ Андрій Михайлович,  
кандидат технічних наук, доцент

Дніпро – 2026

## АНОТАЦІЯ

*Хоменко Ю. Л.* Підвищення ефективності транспортно–технологічної системи експорту зернових у змішаному автомобільно-залізнично-водному сполученні. – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора філософії за спеціальністю 275 – Транспортні технології (за видами). – Український державний університет науки і технологій, МОН України, Дніпро, 2026.

Дисертацію присвячено вирішенню наукового завдання з підвищення ефективності транспортно-технологічної системи експорту зернових вантажів у змішаному автомобільно-залізнично-водному сполученні шляхом обґрунтування розмірів робочих парків транспортних засобів. Це дозволить прискорити процес транспортування та оптимізувати використання рухомого складу різних видів транспорту.

Наукова новизна дисертаційної роботи полягає у вирішенні науково-прикладного завдання оптимізації параметрів транспортно-технологічних ліній для забезпечення постачання значних обсягів зернових, зернобобових, продуктів перемолу та олійних від місць зародження до прикордонних митних переходів (як сухопутних, так і морських). В роботі вперше:

- формалізовано процес постачання зернових вантажів навалом у глобальних ланцюгах постачання на основі багатокритеріальної оптимізаційної моделі, що, на відміну від існуючих підходів, відображає функціонування єдиної автомобільно-залізнично-водної транспортно-технологічної системи;

- розроблено метод нормування парку транспортних засобів, який, на відміну від існуючих, передбачає централізоване управління парками транспортних засобів у межах єдиної системи типу «множина автомобілів – відправницький залізничний маршрут – морське судно» в ланцюзі постачання зернових;

- встановлено закономірності формування надлишкової вантажної маси та її грошового еквівалента залежно від розміру робочого парку транспортних засобів у межах єдиної автомобільно-залізнично-водної транспортно-технологічної системи.

Доопрацьовано:

- імітаційну модель процесу постачання зернових вантажів, яка, на відміну від існуючих, передбачає оптимізацію параметрів єдиної автомобільно-залізнично-водної транспортно-технологічної системи за інтегральним критерієм мінімізації часу та системою критеріїв ефективності використання парків транспортних засобів.

У вступі обґрунтовано актуальність теми, сформульовано мету та задачі дослідження, відображено наукову новизну та практичну цінність одержаних результатів, наведено загальну характеристику роботи.

Перший розділ присвячено аналізу сучасного стану виробництва сільгосппродукції, теоретичних основ та технології організації перевезень зернових вантажів.

Визначено, що сільськогосподарська продукція, зокрема зернові, є вагомою складовою світового товарного ринку, що формує базис глобальної продовольчої безпеки. Україна є одним із найбільших країн-експортерів, яка до 2021 року забезпечувала близько 4% світового виробництва зернових, займаючи 5 місце серед експортерів пшениці станом на 2021/2022 м.р. Початок повномасштабної військової агресії російської федерації призвів до блокування морських портів, руйнації інфраструктури та скорочення доступних посівних площ. Наслідком цього стало скорочення врожайності основних культур на 22-30%.

Для забезпечення перевезень зернових на експорт використовуються різні види транспорту, основним із яких є залізничний, що пояснюється його можливостями перевезення великих обсягів вантажів з відносно невеликою собівартістю. До 2022 року понад 90% експорту зернових здійснювалося через морські порти, при цьому залізниця забезпечувала підвезення 55-60% обсягів, автомобільний транспорт – 30-35%, річковий – 7-10%.

Аналіз наукових праць дослідників, які вивчали питання організації та оптимізації перевезення вантажів маршрутами показало, що вони здебільшого зосереджені на питаннях оптимізації маси та довжини, використання рухомого складу або зменшення собівартості перевезень. При цьому питання формування товарних запасів як на елеваторах у місцях зародження вантажопотоків, так і на

шляху прямування та у морських портах залишалося поза увагою. Також недостатньо дослідженим залишилося питання впливу технології виконання перевезень на записи протягом всього ланцюга.

Встановлено, що методологічною основою сучасних досліджень є об'єктно-орієнтоване та агентне моделювання, що дозволяє симулювати поведінку потоків зернових в портах із врахуванням «запасів в дорозі». Використання програмного забезпечення, що поєднує дискретно-подійний та агентно-орієнтований підходи (наприклад, AnyLogic), дозволяє визначити комплексні раціональні показники роботи ланцюга з урахуванням затримок та порушень.

Повернення до традиційних напрямків транспортування зернових вантажів – через морські порти, знов актуалізувало питання оптимізації процесу змішаних перевезень. Аналіз проведених досліджень показав, що як інструменти покращення досліджувалися різні варіанти покращення роботи різних елементів цієї системи – маршрутизація залізничних перевезень, створення мережі вузлових елеваторів для концентрації маси зернових вантажів, впровадження руху маршрутних поїздів за розкладом. Проте, аналіз цих досліджень показав, що ряд питань, зокрема пов'язаних із розв'язанням питань щодо оптимізації роботи транспортних засобів та раціональної кількості запасів на шляху прямування залишилися не вирішеними.

Аналіз наукових праць дозволив встановити, що питання підвищення ефективності транспортно-технологічних ліній перевезення зернових вантажів на експорт є актуальним. Щодо інструментів, які використовуються для проведення моделювання роботи мультимодальних систем перевезення зернових вантажів, дослідженням встановлено, що агентне моделювання є сучасним та актуальним інструментом, який дозволяє виконати всебічний аналіз всіх параметрів транспортно-технологічних ліній перевезення зернових вантажів.

Другий розділ присвячено аналізу сучасного стану та напрямків розвитку транспортно-технологічних ліній. Визначено, що Україна має стабільно зростаючий аграрний сектор, зокрема у 2021 році спостерігався найбільший в історії країни обсяг експорту пшениці. Встановлено, що ще до початку військової агресії проти нашої країни національна транспортна система стикалася із складностями організації

перевезень зернових вантажів на експорт, що в свою чергу впливає на світову продовольчу безпеку.

Було виконано дослідження ринку зернових за 2021/22 маркетинговий рік, яке встановило, що Україна входить до п'ятірки лідерів з експорту зерна пшениці. При цьому найбільші країни-експортери знаходяться на значній відстані, що вимагає ефективної організації ланцюгів постачання зернових та підвищення відмовостійкості транспортної системи та аграрно-промислового комплексу. Проведений аналіз обсягів виробництва зернових в Україні показав, що найбільші обсяги виробляються у Вінницькій (65956,5 тис. ц.), Чернігівській (57334,1 тис. ц.) та Полтавській (56837,0 тис. ц.) областях. Дослідження обсягів відправки зернових на експорт по регіональних філіях акціонерного товариства «Українські залізниці» встановило, що найбільшими відправниками є Південно-Західна та Південна регіональні філії.

Також у розділі проведено аналіз рейтингу пунктів пропуску міждержавного кордону за річними обсягами перевезень вантажів. Аналіз показав, що найбільший обсяг зернових переміщується через Південний та Миколаївський морський порти (13818,4 тис. т. та 5087,2 тис. т. відповідно). Встановлено, що станом на кінець 2021 року загальний обсяг експортованих вантажів становив близько 28,414 млн тонн без урахування разових автомобільних перевезень у міжнародних перевезеннях. Водночас після початку агресії з боку РФ, окупації частини Херсонської області та постійних обстрілів Миколаївського торговельного порту могли бути використані практично лише порти «Великої Одеси»: Одеса, Чорноморськ, Південний та інші південно-західні порти, такі як Рені. Для встановлення раціональних маршрутів просування зернових складено матриці відстаней перевезень між залізницями відправлення та морськими портами, через які здійснюється експорт продукції. Пропорційним методом, за аналогією з вартістю перевезень в країнах ЄС та США, було складено матрицю вартості транспортування 1 тони зернових вантажів залізничним транспортом для подальшого визначення економічного ефекту.

У розділі проаналізовано ефективність сучасних транспортно-технологічних ліній, при цьому розглянуто три основних варіанти транспортування за участю

різних видів транспорту, як із застосуванням пунктів консолідації вантажів, так і без них. Встановлено, що з технічної точки зору, поєднання морського, залізничного та автомобільного транспорту є найбільш ефективним.

Проведений аналіз інфраструктури морських портів показав, що розвивати їх досить складно через щільну міську забудову навколо них та складність відчуження необхідних територій. Це спонукає відправників перевозити зернові виключно автомобільним транспортом від місць збору врожаю до порту, оскільки це вимагає мінімуму залучення інфраструктури, але в той же час негативно відбивається на вартості транспортування. Таким чином, постає науково-прикладне завдання оптимізації параметрів транспортно–технологічних ліній для забезпечення постачання значних обсягів зернових, зернобобових, продуктів перемолу та олійних від місць зародження до прикордонних митних переходів (як сухопутних, так і морських). Як показало дослідження, це завдання особливо актуальне для регіонів Південно-Західної та Південної філій.

Третій розділ присвячено математичному моделюванню транспортно-технологічної лінії доставки зернових у змішаному сполученні. Було сформовано наукове завдання – провести обґрунтування оптимальних параметрів транспортно-технологічної системи доставки зернових з України у глобальних маршрутах постачання. В якості критерію оптимізації було обрано час доставки вантажів, оскільки саме цей показник враховує можливі затримки, порушення у роботі та раціональне використання рухомого складу і транспортної інфраструктури. Також цей критерій адекватно відображає раціональність технологічних процесів різних видів транспорту, ефективність їх взаємодії та організацію роботи пунктів консолідації вантажів.

Формалізовано процес доставки зернових у глобальних ланцюгах постачання шляхом розробки математичної (імітаційної) моделі з визначеним критерієм оптимізації. Як критерій оптимізації обрано час доставки, який є ключовим показником ефективності транспортно-технологічної системи. Розроблена модель враховує основні складові часу перевезення, зокрема використання автомобільного, залізничного та морського транспорту. Цільова функція моделі представлена в

неввному вигляді, що потребує її реалізації за допомогою комп'ютерної імітації. Імітаційна модель процесу доставки зернових у змішаному автомобільно-залізнично-водному сполученні враховує багатофазовий і складний характер цього процесу з багатьма вихідними параметрами, підсистемами та технологічними елементами.

Для забезпечення достовірності результатів проведено серію експериментів із однаковою кількістю реплікацій (400 реплікацій) та різною тривалістю модельного часу (від 1 до 30 місяців). Встановлено, що за граничного значення однієї реплікації та модельного часу не менше трьох місяців забезпечується достовірність результатів на рівні 95% із похибкою, що не перевищує 0,05.

Для практичного використання теоретичних положень, запропонованих у цьому розділі, прийнято рішення в подальшому реалізувати модель на прикладі одного з типових для України ланцюгів постачання зернових. Це дозволить визначити числові значення оптимальних параметрів транспортно-технологічної системи постачання зернових у змішаному автомобільно-залізнично-водному сполученні.

У четвертому розділі розроблені практичні рекомендації щодо вдосконалення технологічних ліній доставки зернових у змішаному сполученні. Використовуючи результати проведеного статистичного аналізу та математичного моделювання, а також за допомогою розробленої оптимізаційної та імітаційної моделі здійснено серію експериментів для моделювання умов перевезення зернових вантажів з України на експорт.

Експериментальні дослідження включали три серії експериментів, спрямованих на аналіз різних обсягів вантажоперевезень із Полтавської області. Перший експеримент базувався на даних 2021 року із річним обсягом перевезень 883 560 тонн. Другий експеримент враховував прогнозований річний обсяг перевезень у розмірі 1 млн тонн. Третій експеримент був спрямований на аналіз прогнозованого обсягу 1,5 млн тонн.

Результати дослідження показали, що щільність ймовірності розподілу часу очікування вантажів для вантажних автомобілів та залізничних відправницьких

маршрутів відповідає нормальному закону розподілу. Аналогічно, щільність розподілу часу обороту вантажних автомобілів та залізничних маршрутів також підпорядковується нормальному закону розподілу.

Встановлено, що для типових технологічних умов експлуатації транспортних засобів та технологічних систем перевезення зернових культур обсягом 883 560 тонн на рік оптимальні параметри робочого парку складають 79 вантажних автомобілів (із коефіцієнтом завантаження парку 0,54) та три залізничні відправницькі маршрути (із коефіцієнтом завантаження парку 0,63%).

Для перевезення одного мільйона тонн зернових на рік оптимальний робочий парк становить 92 вантажні автомобілі (із коефіцієнтом завантаження 0,52) та чотири залізничні відправницькі маршрути (із коефіцієнтом завантаження 0,54%). У випадку перевезення 1,5 мільйона тонн на рік необхідно задіяти 106 вантажних автомобілів (із коефіцієнтом завантаження 0,68) та п'ять залізничних відправницьких маршрутів (із коефіцієнтом завантаження 0,64%).

У кожному з розглянутих випадків забезпечується оптимальний рівень завантаження парку транспортних засобів, що дозволяє досягти мінімально можливого часу доставки вантажів по суші. Відповідно до порядкових номерів експериментів цей час становить 322 години, 292 години та 217 годин.

За отриманими даними визначено умови, за яких формуються надлишкові запаси вантажів на транзитних пунктах перевантаження. Такі запаси виникають через неефективне використання транспортного парку, що обумовлено технологічними затримками, відмовами під час вантажних операцій або зменшенням розмірів робочого парку.

Встановлено, що обсяг критичної маси для автомобільної транспортної мережі формується за лінійною закономірністю залежно від розміру робочого парку автомобілів. Для залізничної транспортної мережі ця закономірність є нелінійною.

Встановлено залежності між середнім часом доставки вантажів по суші та обсягом формування вантажної маси для автомобільної та залізничної транспортних систем. Для автомобільної транспортної системи ці залежності з високою

імовірністю апроксимуються логарифмічними функціями, тоді як для залізничної транспортної системи – лінійними функціями.

Виявлено закономірності формування річного обсягу надлишкової вантажної маси та її грошового еквіваленту залежно від розміру робочого парку транспортних засобів. Зокрема, встановлено критичне зниження потреби в рухомому складі порівняно з раніше визначеними граничними рівнями сталого функціонування транспортних систем. Для автомобільної транспортної системи така залежність, аналогічно до закономірності формування вантажної маси, є лінійною, тоді як для залізничної транспортної системи – нелінійною.

При зменшенні робочого парку вантажних автомобілів на 12 одиниць (25% від гранично допустимого розміру парку) наприкінці року експлуатації накопичується 237 000 тонн вантажної маси, що за даними 2025 року еквівалентно 45 млн доларів США. Аналогічне зменшення робочого парку залізничних відправницьких маршрутів на одну одиницю (50% від гранично допустимого рівня) призводить до формування 544 000 тонн вантажної маси, що за біржовими цінами 2025 року становить 106 млн доларів США.

Результати експериментів свідчать, що збільшення робочого парку відносно оптимальних розрахункових значень не покращує технологічні показники функціонування транспортних систем, зокрема середній час доставки вантажу. Натомість це призводить до зростання часу очікування транспортними засобами вантажів для відправлення та збільшення тривалості вантажного обороту транспортних засобів.

Ключові слова: залізничний транспорт, автомобільний транспорт, маршрут, зернові вантажі, надлишкова вантажна маса, агентний принцип, моделювання, інтермодальні перевезення.

## ABSTRACT

Khomenko Y. L. Increasing the efficiency of the transport and technological system of grain export in mixed road-rail-water communication. – Qualification scientific work in the form of a manuscript.

Dissertation for the degree of Doctor of Philosophy in specialty 275 – Transport technologies (by type). – Ukrainian State University of Science and Technology, Ministry of Education and Science of Ukraine, Dnipro, 2026.

The dissertation is devoted to solving the scientific problem of increasing the efficiency of the transport and technological system of grain export in mixed road-rail-water communication by substantiating the size of the working fleets of vehicles. This will speed up the transportation process and optimize the use of rolling stock of various types of transport.

The scientific novelty of the dissertation work lies in solving the scientific and applied problem of optimizing the parameters of transport and technological lines to ensure the supply of significant volumes of grains, legumes, milling products and oilseeds from the places of origin to border customs crossings (both land and sea). In the work, for the first time:

- the process of supplying grain cargo in bulk in global supply chains has been formalized based on a multi-criteria optimization model, which, unlike existing approaches, reflects the functioning of a single road-rail-water transport and technological system;

- a method for regulating the fleet of vehicles has been developed, which, unlike existing ones, provides for centralized management of fleets of vehicles within a single system of the type "multiple cars - sending railway route - sea vessel" in the grain supply chain;

- the regularities of the formation of excess cargo weight and its monetary equivalent depending on the size of the working fleet of vehicles within a single road-rail-water transport and technological system have been established.

The following has been finalized:

- a simulation model of the grain cargo supply process, which, unlike existing ones, provides for optimization of the parameters of a single road-rail-water transport and technological system according to the integral criterion of time minimization and a system of criteria for the efficiency of vehicle fleet use. The introduction substantiates the relevance of the topic, formulates the goal and objectives of the study, reflects the scientific novelty and practical value of the results obtained, and provides a general description of the work.

The first section is devoted to the analysis of the current state of agricultural production, theoretical foundations and technology for organizing grain cargo transportation.

It has been determined that agricultural products, in particular grains, are a significant component of the global commodity market, which forms the basis of global food security. Ukraine is one of the largest exporting countries, which by 2021 provided about 4% of world grain production, ranking 5th among wheat exporters as of 2021/2022. The beginning of the full-scale military aggression of the Russian Federation led to the blockade of seaports, the destruction of infrastructure and the reduction of available sown areas. This resulted in a reduction in the yield of the main crops by 22-30%.

Various types of transport are used to ensure the transportation of grain for export, the main of which is railway, which is explained by its ability to transport large volumes of cargo at a relatively low cost. By 2022, more than 90% of grain exports were carried out through seaports, with railways providing transportation of 55-60% of volumes, road transport – 30-35%, river transport – 7-10%.

An analysis of scientific works by researchers who studied the issues of organizing and optimizing cargo transportation by routes showed that they are mostly focused on issues of optimizing mass and length, using rolling stock or reducing the cost of transportation. At the same time, the issue of the formation of commodity stocks both at elevators in the places of origin of cargo flows, and on the way and in seaports remained out of attention. Also, the issue of the influence of transportation technology on records throughout the chain remained insufficiently studied.

It was established that the methodological basis of modern research is object-oriented and agent-based modeling, which allows simulating the behavior of grain flows in ports taking into account «stocks in transit». The use of software that combines discrete-event and agent-based approaches (for example, AnyLogic) allows determining complex rational indicators of the chain's operation, taking into account delays and violations.

The return to traditional directions of grain cargo transportation - through seaports, once again made the issue of optimizing the process of mixed transportation relevant. The analysis of the conducted research showed that various options for improving the operation of various elements of this system were studied as improvement tools - routing of railway transportation, creation of a network of nodal elevators for concentration of the mass of grain cargo, introduction of scheduled route trains. However, the analysis of these studies showed that a number of issues, in particular related to solving issues related to optimizing the operation of vehicles and the rational amount of reserves on the route, remained unresolved.

The analysis of scientific works made it possible to establish that the issue of increasing the efficiency of transport and technological lines for transporting grain cargo for export is relevant. Regarding the tools used to simulate the operation of multimodal grain cargo transportation systems, the study found that agent modeling is a modern and relevant tool that allows for a comprehensive analysis of all parameters of transport and technological lines for transporting grain cargo.

The second section is devoted to the analysis of the current state and directions of development of transport and technological lines. It was determined that Ukraine has a steadily growing agricultural sector, in particular, in 2021 the largest volume of wheat exports in the country's history was observed. It was established that even before the start of military aggression against our country, the national transport system faced difficulties in organizing the transportation of grain cargo for export, which in turn affects global food security.

A study of the grain market for the 2021/22 marketing year was carried out, which established that Ukraine is among the five leaders in wheat grain exports. At the same time, the largest exporting countries are located at a considerable distance, which requires

effective organization of grain supply chains and increasing the fault tolerance of the transport system and the agro-industrial complex. The analysis of grain production volumes in Ukraine showed that the largest volumes are produced in Vinnytsia (65956,5 thousand tons), Chernihiv (57334,1 thousand tons) and Poltava (56837,0 thousand tons) regions. A study of the volumes of grain exports by regional branches of the Ukrainian Railways Joint Stock Company established that the largest senders are the South-Western and Southern regional branches.

The section also analyzes the rating of interstate border crossing points by annual cargo transportation volumes. The analysis showed that the largest volume of grain is transported through the Southern and Mykolaiv seaports (13818,4 thousand tons and 5087,2 thousand tons, respectively). It was established that as of the end of 2021, the total volume of exported cargo was about 28.414 million tons, excluding one-time road transportation in international transportation. At the same time, after the beginning of the aggression by the Russian Federation, the occupation of part of the Kherson region and constant shelling of the Mykolaiv commercial port, practically only the ports of the «Great Odessa» could be used: Odesa, Chornomorsk, Southern and other southwestern ports, such as Reni. To establish rational routes for the movement of grain, matrices of transportation distances between the departure railways and seaports through which products are exported were compiled. Using the proportional method, by analogy with the cost of transportation in the EU and the USA, a matrix of the cost of transporting 1 ton of grain cargo by rail was compiled to further determine the economic effect.

The section analyzes the efficiency of modern transport and technological lines, while considering three main options for transportation involving different types of transport, both with and without the use of cargo consolidation points. It was established that from a technical point of view, a combination of sea, rail and road transport is the most effective.

The analysis of the infrastructure of seaports showed that it is quite difficult to develop them due to the dense urban development around them and the complexity of alienating the necessary territories. This encourages shippers to transport grain exclusively by road from the harvest sites to the port, since this requires a minimum of infrastructure

involvement, but at the same time has a negative impact on the cost of transportation. Thus, the scientific and applied task of optimizing the parameters of transport and technological lines arises to ensure the supply of significant volumes of grains, legumes, milled products and oilseeds from the places of origin to border customs crossings (both land and sea). As the study has shown, this task is especially relevant for the regions of the South-Western and Southern branches.

The third section is devoted to mathematical modeling of the transport and technological line of grain delivery in mixed mode. A scientific task was formulated - to substantiate the optimal parameters of the transport and technological system of grain delivery from Ukraine in global supply routes. The cargo delivery time was chosen as the optimization criterion, since it is this indicator that takes into account possible delays, disruptions in operation and the rational use of rolling stock and transport infrastructure. This criterion also adequately reflects the rationality of technological processes of various types of transport, the effectiveness of their interaction and the organization of the work of cargo consolidation points. The process of grain delivery in global supply chains was formalized by developing a mathematical (simulation) model with a defined optimization criterion. The delivery time, which is a key indicator of the efficiency of the transport and technological system, was chosen as the optimization criterion. The developed model takes into account the main components of transportation time, in particular the use of road, rail and sea transport. The target function of the model is presented in an implicit form, which requires its implementation using computer simulation. The simulation model of the grain delivery process in a mixed road-rail-water connection takes into account the multi-phase and complex nature of this process with many initial parameters, subsystems and technological elements.

To ensure the reliability of the results, a series of experiments was conducted with the same number of replications (400 replications) and different durations of the model time (from 1 to 30 months). It was established that with a limit value of one replication and a model time of at least three months, the reliability of the results is ensured at the level of 95% with an error not exceeding 0,05.

For the practical use of the theoretical provisions proposed in this section, it was decided to further implement the model on the example of one of the typical grain supply chains for Ukraine. This will allow us to determine the numerical values of the optimal parameters of the transport and technological system for grain supply in a mixed road-rail-water connection.

The fourth section develops practical recommendations for improving technological lines for grain delivery in a mixed connection. Using the results of the statistical analysis and mathematical modeling, as well as using the developed optimization and simulation model, a series of experiments were carried out to simulate the conditions for transporting grain cargo from Ukraine for export.

Experimental studies included three series of experiments aimed at analyzing different volumes of cargo transportation from the Poltava region. The first experiment was based on data from 2021 with an annual transportation volume of 883,560 tons. The second experiment took into account the projected annual transportation volume of 1 million tons. The third experiment was aimed at analyzing the projected volume of 1,5 million tons.

The results of the study showed that the probability density of the distribution of cargo waiting times for trucks and rail dispatch routes corresponds to the normal distribution law. Similarly, the density of the distribution of truck and rail dispatch time also obeys the normal distribution law.

It was found that for typical technological operating conditions of vehicles and technological systems for transporting grain crops with a volume of 883,560 tons per year, the optimal parameters of the working fleet are 79 trucks (with a fleet load factor of 0,54) and three rail dispatch routes (with a fleet load factor of 0,63%).

For the transportation of one million tons of grain per year, the optimal working fleet is 92 trucks (with a load factor of 0,52) and four rail dispatch routes (with a load factor of 0,54%). In the case of transporting 1.5 million tons per year, it is necessary to use 106 trucks (with a load factor of 0.68) and five railway dispatch routes (with a load factor of 0,64%).

In each of the considered cases, the optimal level of loading of the vehicle fleet is ensured, which allows achieving the minimum possible time for delivering goods by land.

According to the serial numbers of the experiments, this time is 322 hours, 292 hours and 217 hours.

According to the obtained data, the conditions under which excess cargo stocks are formed at transit transshipment points are determined. Such stocks arise due to inefficient use of the transport fleet, which is due to technological delays, failures during cargo operations or a decrease in the size of the working fleet.

It was established that the volume of critical mass for the road transport network is formed according to a linear pattern depending on the size of the working fleet of vehicles. For the railway transport network, this pattern is nonlinear.

Dependencies between the average time of delivery of goods by land and the volume of cargo mass formation for the road and railway transport systems have been established. For the road transport system, these dependencies are approximated with high probability by logarithmic functions, while for the railway transport system, they are approximated by linear functions.

Regularities in the formation of the annual volume of excess cargo mass and its monetary equivalent depending on the size of the working fleet of vehicles have been identified. In particular, a critical decrease in the need for rolling stock compared to the previously defined limit levels of sustainable operation of transport systems has been established. For the road transport system, this dependence, similar to the regularity of the formation of cargo mass, is linear, while for the railway transport system it is nonlinear.

When reducing the working fleet of trucks by 12 units (25% of the maximum allowable size of the fleet), 237,000 tons of cargo mass accumulate at the end of the year of operation, which according to 2025 data is equivalent to 45 million US dollars. A similar reduction in the working fleet of railway dispatch routes by one unit (50% of the maximum allowable level) leads to the formation of 544,000 tons of cargo mass, which at stock prices in 2025 is 106 million US dollars.

The results of the experiments show that an increase in the working fleet relative to the optimal calculated values does not improve the technological indicators of the functioning of transport systems, in particular the average cargo delivery time. Instead, this

leads to an increase in the waiting time for cargo vehicles to be dispatched and an increase in the duration of cargo turnover of vehicles.

Keywords: railway transport, road transport, route, grain cargo, excess cargo weight, agent principle, modeling, intermodal transportation.

#### Список публікацій здобувача

##### **Основні наукові праці:**

*Публікації у науковому фаховому виданні України категорії «Б», що включене до міжнародних наукометричних баз:*

1. Хоменко Ю. Л., Окороків А. М. Дослідження експортних вантажопотоків зернових з України. *Транспортні системи та технології перевезень*. 2023. Вип. 26. С. 85–92. DOI: 10.15802/tstt2023/293358.

2. Khomenko Yu., Matsiuk V., Okorokov A., Gorobchenko O. Development of a simulation model of grain delivery in global supply chains. *Scientific Reports of the National University of Life and Environmental Sciences of Ukraine*. 2024. Vol. 2, № 5. P. 21-35. DOI: 10.31548/dopovidi/5.2024.21.

3. Хоменко Ю. Л. Аналіз ефективності існуючих транспортно-технічних ліній транспортування зернових з України. *Транспортні системи та технології перевезень*. 2025. Вип. 30. С. 79-87. DOI: 10.15802/tstt2025/340140.

*Публікації у фаховому виданні України категорії «А», що включене до міжнародних наукометричних баз:*

4. Khomenko Yu., Okorokov A., Matsiuk V., Zhuravel I., Pavlenko O. Revealing the causes of delays at transit points along an intermodal grain supply chain. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2025. Vol. 4, № 3 (136). P. 40-50. DOI: 10.15587/1729-4061.2025.338166.

5. Zaruba O., Okorokov A., Vernyhora R., Prokopa O., Khomenko Yu. Assessing the efficiency of centralized use of train formations within an extensive supply network for metallurgical production. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2025. Vol. 5, № 3 (137). P. 48–56. DOI: 10.15587/1729-4061.2025.342416

### Додаткові праці апробаційного характеру:

#### Тези доповіді:

6. О कोरोков А. М., Вернигора Р. В., Хоменко Ю. Л. Альтернативні варіанти перевезення аграрної продукції на експорт та їх загальна оцінка. *Збірник тез доповідей наукової конференції професорсько-викладацького складу, аспірантів, студентів та співробітників відокремлених структурних підрозділів університету (м. Київ, Україна, 17–19 травня 2023 року)*. Київ: НТУ, 2023. Вип. 79. С. 341-342.

7. Khomenko Y., Okorokov A., Vernyhora R. Logistics systems for the export of agricultural products of Ukraine in the context of military aggression. *The proceedings of the international scientific-practical conference on «The fourth industrial revolution and innovative technologies» (м. Гянджа, республіка Азербайджан, 2–3 травня 2023 року)*. Баку: АТУ, 2023. Ч. 2. С. 309-310.

8. О कोरोков А. М., Вернигора Р. В., Хоменко Ю. Л. Проблеми та ризики при перевезенні зернових через західні кордони України. *Матеріали 82 Міжнародної науково-практичної конференції «Проблеми та перспективи розвитку залізничного транспорту» (м. Дніпро, Україна, 20–21 квітня 2023 року)*. Дніпро: УДУНТ, 2023. С. 250-251.

9. Хоменко Ю. Л., О कोरोков А. М. Моделювання процесу доставки зернових у напрямку ЄС. *Тези доповідей міжнародної науково-технічної конференції «Університетська наука – 2024» (м. Дніпро, Україна, 23-24 травня 2024 року)*. Дніпро: ДВНЗ «ПДТУ», 2024. Том 1. С. 195-197.

10. Хоменко Ю. Л. Формалізація процесу постачання зернових у глобальних ланцюгах постачання. *Збірник тез доповідей Всеукраїнської науково-технічної конференції студентів і молодих учених «Наука і сталий розвиток транспорту 2024» (м. Дніпро, Україна, 27 листопада 2024 року)*. Дніпро: УДУНТ, 2024. С. 55-56.

11. О कोरोков А. М., Хоменко Ю. Л., Medina Carlos Moyses Carranza. Складові системи моделі постачання зернових вантажів на експорт. *Тези 13-ї міжнародної науково-практичної конференції «Перспективи взаємодії залізниць та*

*промислових підприємств» (м. Дніпро, Україна, 28-29 листопада 2024 року). Дніпро: УДУНТ, 2024. С. 64-65.*

12. Хоменко Ю. Л., Окороков А. М. Оптимізація параметрів лінії постачання зернових у змішаному сполученні. *Тези доповідей міжнародної науково-технічної конференції «Університетська наука – 2025» (м. Дніпро, Україна, 15-16 травня 2025 року). Дніпро: ДВНЗ «ПДТУ», 2025. Том 1. С. 173-174.*

13. Хоменко Ю. Л., Окороков А. М. Підвищення ефективності інтермодальних ланцюгів постачання зернових засобами агентної симуляції. *Матеріали 21 науково-практичної міжнародної конференції «Міжнародна транспортна інфраструктура, промислові центри та корпоративна логістика» (м. Харків, Україна, 5-6 червня 2025 року). Харків: УкрДУЗТ, 2025. С. 169-171.*

## ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ	23
ВСТУП	24
РОЗДІЛ 1 ПРОБЛЕМИ ОРГАНІЗАЦІЇ ЕКСПОРТНИХ ПЕРЕВЕЗЕНЬ ЗЕРНОВИХ ВАНТАЖІВ В УКРАЇНІ ТА ОСНОВНІ НАПРЯМКИ ЇХ ВИРІШЕННЯ	31
1.1 Аналіз світового ринку зернових, обсягів виробництва та експорту в Україні, та впливу військової агресії російської федерації	
1.2 Аналіз транспортного забезпечення перевезення зернових	38
1.2.1 Аналіз наукових досліджень технології транспортування зернових вантажів в Україні та за кордоном	40
1.2.2 Аналіз наукових досліджень щодо впливу технології перевізного процесу на утворення запасів	46
1.2.3 Аналіз досвіду інших країн з організації перевезень зернових вантажів та впливу на запаси	48
1.3 Аналіз сучасних інструментів досліджень ланцюгів постачань зернових вантажів та технологічних процесів перевантажувальних пунктів	51
1.4 Висновки по розділу 1	54
РОЗДІЛ 2 СУЧАСНИЙ СТАН І ПЕРСПЕКТИВНІ НАПРЯМКИ РОЗВИТКУ ТРАНСПОРТНО-ТЕХНОЛОГІЧНИХ ЛІНІЙ ДОСТАВКИ ЗЕРНОВИХ	57
2.1 Аналіз структури експортних вантажопотоків зернових і зернобобових в Україні	57
2.2 Аналіз ефективності існуючих транспортно-технологічних ліній транспортування зернових	71
2.3 Висновки до розділу 2	81
РОЗДІЛ 3 МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ТРАНСПОРТНО- ТЕХНОЛОГІЧНОЇ ЛІНІЇ ДОСТАВКИ ЗЕРНОВИХ У ЗМІШАНОМУ СПОЛУЧЕННІ	83
3.1 Обґрунтування критеріїв оптимізації математичної моделі	83

3.2 Математична модель процесу доставки зернових у змішаному автомобільно-залізнично-водному сполученні	84
3.3 Формалізація процесів транспортно-технологічної лінії доставки зернових у змішаному, автомобільно-залізнично-водному сполученні	89
3.4 Імітаційна модель процесу доставки зернових у змішаному автомобільно-залізнично-водному сполученні	93
3.4.1 Налаштування агенту Main	94
3.4.2 Налаштування популяції агентів «Пункти відправлення зернових»	95
3.4.3 Налаштування агентів «Автомобільна лінія», «Залізнична лінія» та «Морська лінія»	98
3.5 Припущення та обмеження при розробці моделі	100
3.6 Забезпечення достовірності результатів моделювання	101
3.7 Висновки по розділу 3	105
РОЗДІЛ 4 РОЗРОБКА ПРАКТИЧНИХ РЕКОМЕНДАЦІЙ ЩОДО ВДОСКОНАЛЕННЯ ТЕХНОЛОГІЧНИХ ЛІНІЙ ДОСТАВКИ ЗЕРНОВИХ У ЗМІШАНОМУ СПОЛУЧЕННІ	107
4.1 Встановлення оптимальних параметрів транспортно-технологічної лінії постачання зернових у змішаному автомобільно-залізнично-водному сполученні	107
4.2 Дослідження закономірностей впливу вихідних параметрів системи на її продуктивність та показники ефективності	123
4.3 Оцінка обсягів затримки вантажів унаслідок критичного зниження робочого парку транспортних засобів транспортно-технологічної лінії постачання зернових у змішаному автомобільно-залізнично-водному сполученні	131
4.4 Висновки по розділу 4	139
ВИСНОВКИ	142
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	147
Додаток А Картограма зародження вантажопотоку	162
Додаток Б Складові елементи моделі	163

Додаток В Налаштування моделі та результати експериментів оптимізації	167
Додаток Г Список публікацій здобувача за темою дисертації та відомості про апробацію результатів дисертації	171
Додаток Д Акти впровадження результатів дисертаційної роботи	174

## ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ

КМУ – Кабінет Міністрів України

ООН – Організація об'єднаних націй

МОН – Міністерство освіти та науки

США – Сполучені Штати Америки

МР – маркетинговий рік

ГЗСЛ – гамільтонова задача про сільського листоношу

КЗСЛ – кільцева задач про сільського листоношу

рф – російська федерація

UNCTAD – конференція ООН з торгівлі та розвитку

## ВСТУП

**Актуальність теми.** Виробництво зернових є ключовим чинником національної та світової продовольчої безпеки. Експорт зернових – один із основних елементів економіки України, що є особливо важливим у період повномасштабної війни. Підвищення ефективності системи перевезень зернових вантажів відіграє позитивну роль у зростанні національної економіки та підвищенні продовольчої безпеки країн світу.

Процес виробництва та доставки зернової товарної маси у глобальні ланцюги постачання є складною багатофазною інтермодальною транспортно-технологічною системою. Вона являє собою процес взаємодії множини перевізників і пунктів взаємодії між ними, що функціонують як транзитні зернові елеватори, призначені для тимчасового зберігання зерна та його накопичення до досягнення норми завантаження для наступного етапу транспортування. У випадку організації перевезень в інтермодальному автомобільно-залізнично-водному сполученні, що є найефективнішим способом транспортування зернових, кожна наступна фаза передбачає застосування транспортних засобів із вищою нормою завантаження.

Такий підхід потребує додаткового часу для накопичення вантажу до необхідного обсягу, що зумовлює формування надлишкової маси зерна у транзитних пунктах. Обсяг цієї технічної надлишкової маси прямо залежить від затримок у технологічному циклі обігу транспортних одиниць на кожному з інтермодальних етапів перевезення. Відтак, оптимізація параметрів транспортно-технологічних підсистем інтермодальних перевезень є актуальною науково-прикладною задачею, особливо в контексті ефективної організації глобальних ланцюгів постачання зернових.

Зважаючи на вищезазначене, тема даної дисертаційної роботи є актуальною, орієнтованою на вирішення важливого наукового завдання - підвищення ефективності транспортно-технологічної системи експорту зернових вантажів у змішаному автомобільно-залізнично-водному сполученні шляхом обґрунтування розмірів робочих парків транспортних засобів. Це дозволить прискорити процес

транспортування та оптимізувати використання рухомого складу різних видів транспорту.

**Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.** Дисертаційна робота виконувалась у відповідності до положень Національної транспортної стратегії України на період до 2030 року (розпорядження Кабінету Міністрів України (КМУ) від 30 травня 2018 р. № 430-р), Постанови Кабінету Міністрів України «Про виконання Угоди про асоціацію між Україною, з однієї сторони, та Європейським Союзом, Європейським співтовариством з атомної енергії і їхніми державами-членами, з іншої сторони», ратифікованою із заявою Законом № 1678-VII від 16.09.2014 зі змінами, а також відповідно до Резолюції Генеральної Асамблеї ООН «Гуманітарні наслідки агресії проти України» від 02.03.2022 року.

**Мета і завдання дослідження.** Метою дисертаційного дослідження є підвищення ефективності функціонування транспортно-технологічної лінії експорту зернових у змішаному автомобільно-залізнично-водному сполученні через обґрунтування раціонального розміру парків транспортних засобів та використання системних показників ефективності перевезень.

Для досягнення зазначеної мети передбачено виконання таких наукових завдань:

- проаналізувати сучасний стан, теоретичні основи та технології організації перевезення зернових вантажів;
- провести аналіз структури та обсягів експортних вантажопотоків зернових і зернобобових культур з території України;
- проаналізувати теоретичні основи та практичні аспекти транспортного забезпечення перевезень зернових на експорт;
- здійснити оцінку ефективності існуючих транспортно-технологічних ліній для перевезення зернових;
- розробити оптимізаційну математичну модель процесу доставки зернових у змішаному автомобільно-залізнично-водному сполученні;
- розробити імітаційну модель процесу доставки зернових у змішаному автомобільно-залізнично-водному сполученні;

- експериментально визначити оптимальні розміри парків транспортних засобів автомобільного та залізничного транспорту для актуальних і прогнозованих обсягів експорту зернових на прикладі одного з центральних регіонів України;

- встановити залежності впливу змін у розмірах робочих парків автомобільного та залізничного транспорту на час доставки вантажу та обсяги формування вантажної маси в пунктах завантаження із наданням економічної оцінки.

*Об'єкт дослідження* – транспортний-технологічний процес доставки зернових у змішаному сполученні.

*Предмет дослідження* – технологія взаємодії залізничного транспорту із автомобільним та водним при організації перевезення зернових вантажів.

#### **Методи дослідження.**

В роботі застосовано методи аналізу, синтезу та систематизації під час проведення дослідження світового та українського ринку зернових, обсягів виробництва та експорту, оцінки ефективності існуючих транспортно-технологічних ліній перевезення зернових та аналізу теоретичних основ та практичних аспектів транспортного забезпечення експорту зернових.

Для формалізації процесу постачання зернових в єдиній автомобільно-залізнично-водній транспортно-технологічній системі у вигляді багатокритеріальної оптимізаційної математичної моделі, розроблення оптимізаційної математичної моделі процесу доставки зернових та обґрунтування оптимальних параметрів транспортно-технологічної системи доставки зернових на експорт використано методи математичної статистики, теорії ймовірності та стохастичних процесів, теорії транспортних процесів та систем, а також стохастичних процесів.

Методи теорії масового обслуговування, агентного та дискретно-подієвого та оптимізаційного моделювання застосовано для розроблення імітаційної моделі доставки вантажів у змішаному автомобільно-залізнично-водному сполученні. При визначенні комплексних раціональних показників роботи ланцюга постачань з урахуванням затримок та порушень застосовано метод аналізу чутливості.

### **Наукова новизна отриманих результатів.**

Вперше:

- формалізовано процес постачання зернових вантажів навалом у глобальних ланцюгах постачання на основі багатокритеріальної оптимізаційної моделі, що, на відміну від існуючих підходів, відображає функціонування єдиної автомобільно-залізнично-водної транспортно-технологічної системи;

- розроблено метод нормування парку транспортних засобів, який, на відміну від існуючих, передбачає централізоване управління парками транспортних засобів у межах єдиної системи типу «множина автомобілів – відправницький залізничний маршрут – морське судно» в ланцюзі постачання зернових;

- встановлено закономірності формування надлишкової вантажної маси та її грошового еквівалента залежно від розміру робочого парку транспортних засобів у межах єдиної автомобільно-залізнично-водної транспортно-технологічної системи.

Доопрацьовано:

- імітаційну модель процесу постачання зернових вантажів, яка, на відміну від існуючих, передбачає оптимізацію параметрів єдиної автомобільно-залізнично-водної транспортно-технологічної системи за інтегральним критерієм мінімізації часу та системою критеріїв ефективності використання парків транспортних засобів.

### **Практичне значення одержаних результатів.**

Практичні результати дисертаційної роботи полягають у розробці та обґрунтуванні комплексу науково-методичних положень, математичних моделей та практичних рекомендацій, що спрямовані на підвищення ефективності функціонування транспортно-технологічної схеми перевезень зернових вантажів на експорт у змішаному автомобільно-залізнично-водному сполученні.

Розроблена багатокритеріальна оптимізаційна модель процесу постачання зернових у межах єдиної автомобільно-залізнично-водної транспортно-технологічної системи дозволяє формалізувати та кількісно оцінити складну взаємодію різних видів транспорту та пунктів перевалки. В якості критерію оптимізації обрано мінімізацію часу доставки вантажу. Використання моделі на рівні оперативного управління логістичними ланцюгами дозволить керівникам

транспортних підприємств та агропромислових компаній приймати обґрунтовані рішення щодо вибору раціональних маршрутів та технологій перевезення, що є особливо актуальним в умовах змін логістичних шляхів через військову агресію.

Запропонований метод нормування парку транспортних засобів дозволяє обґрунтувати оптимальні розміри робочих парків автомобільного та залізничного транспорту для заданих обсягів експорту (наприклад, 1 млн тонн на рік) з урахуванням необхідності накопичення вантажної маси на транзитних пунктах. Застосування цього методу дозволить уникнути як дефіциту рухомого складу, що спричиняє затримки та формування надлишкових запасів, так і його надлишку, який веде до неефективного використання активів та збільшення часу очікування вантажу.

Встановлені закономірності формування надлишкової вантажної маси та її грошового еквівалента залежно від розміру робочого парку транспортних засобів. Виявлено, що обсяг критичної маси для автомобільної мережі формується за лінійною закономірністю, тоді як для залізничної – за нелінійною. З практичної точки зору це дає змогу оцінювати економічні втрати від технологічних затримок та відмов у роботі транспортної системи. Також результати можуть бути використані для розрахунку економічного ефекту від впровадження оптимізаційних заходів, а також для обґрунтування інвестицій у розвиток інфраструктури (збільшення потужності елеваторів або розширення пропускної спроможності прикордонних переходів).

Одержані рішення та моделі мають прикладний характер та застосовуються суб'єктами господарювання України, зокрема регіональною філією «Придніпровська залізниця» акціонерного товариства «Українська залізниця», а також впроваджені у навчальний процес факультету «Управління процесами перевезень» Українського державного університету науки і технологій.

**Особистий внесок здобувача.** У наукових працях, опублікованих зі співавторами, особистий внесок здобувача полягає у такому: у роботі [1] проаналізовано особливості формування вантажопотоків зернових експортного спрямування, розподіл обсягів зародження зернових вантажів по залізничних

станціях відправлення у 2021/2022 м.р., проведено апроксимацію теоретичними законами розподілу щільності середньомісячних обсягів відправки вагонів із зерновими на експорт за даними 2021/2022 м.р.; у роботі [2] проведено аналіз наукових основ інтермодальних перевезень в глобальних ланцюгах постачань, в тому числі перевезення зернових вантажів в напрямку морських портів, розроблено оптимізаційну імітаційну модель мультимодального перевезення зернових вантажів, обґрунтовано вибір критерію оптимальності; у [4] розроблено математичну модель транспортного процесу інтермодального ланцюга постачання зернових на основі агентного та дискретно-подієвого підходів, експериментально визначено ступінь впливу розмірів експлуатаційних парків автомобільного й залізничного транспорту на середній час доставки вантажу та обсяги накопичення вантажу в пунктах завантаження; у [5] проведено аналіз досліджень у сфері організації перевізного процесу залізницями та методик підвищення ефективності використання залізничної інфраструктури, визначено їх недоліки та запропоновано шляхи вирішення. Робота [3] опублікована без співавторів.

**Апробація результатів дисертації.** Основні положення дисертаційної роботи доповідалися, обговорювалися та були ухвалені на таких конференціях: науковій конференції професорсько-викладацького складу, аспірантів, студентів та співробітників відокремлених структурних підрозділів університету (м. Київ, Україна, 17-19 травня 2023 року); «The fourth industrial revolution and innovative technologies» (м. Гянджа, республіка Азербайджан, 2-3 травня 2023 року); 82-й Міжнародній науково-практичній конференції «Проблеми та перспективи розвитку залізничного транспорту» (м. Дніпро, Україна, 20-21 квітня 2023 року); Міжнародній науково-технічній конференції «Університетська наука – 2024» (м. Дніпро, Україна, 23-24 травня 2024 року); Всеукраїнській науково-технічній конференції студентів і молодих учених «Наука і сталий розвиток транспорту 2024» (м. Дніпро, Україна, 27 листопада 2024 року); 13-й міжнародній науково-практичній конференції «Перспективи взаємодії залізниць та промислових підприємств» (м. Дніпро, Україна, 28-29 листопада 2024 року); Міжнародній науково-технічній конференції «Університетська наука – 2025» (м. Дніпро, Україна, 15-16 травня 2025 року); 21-й

науково-практичній міжнародній конференції «Міжнародна транспортна інфраструктура, індустріальні центри та корпоративна логістика» (м. Харків, Україна, 5-6 червня 2025 року).

**Публікації.** Відповідно до теми дисертаційної роботи опубліковано 3 наукові статі, що опубліковані у фахових наукових виданнях, затверджених МОН України (1 з них є одноосібною), 2 статті у виданнях категорії «А», що включені до бази Scopus Q3, 8 тез доповідей на науково-практичних конференціях.

**Структура та обсяг дисертації.** Дисертація складається з анотацій, вступу, чотирьох розділів, загальних висновків, списку використаних джерел та додатків.

Повний обсяг дисертації складає 176 сторінок, з яких обсяг основного тексту – 123 сторінки, 59 рисунків і 30 таблиць за текстом, список використаних джерел із 121 найменування, і 5 додатків.

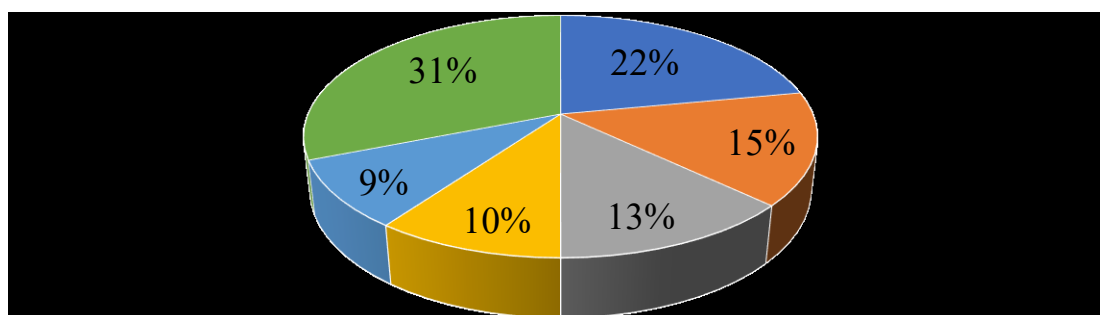
## РОЗДІЛ 1

ПРОБЛЕМИ ОРГАНІЗАЦІЇ ЕКСПОРТНИХ ПЕРЕВЕЗЕНЬ ЗЕРНОВИХ  
ВАНТАЖІВ В УКРАЇНІ ТА ОСНОВНІ НАПРЯМКИ ЇХ ВИРІШЕННЯ

1.1 Аналіз світового ринку зернових, обсягів виробництва та експорту в Україні, та впливу військової агресії російської федерації

Зерновий ринок формує основу глобальної продовольчої безпеки, тому його важливість в світовій ринковій архітектурі складно переоцінити. Для експортерів зернові культури є не тільки запорукою забезпечення і підтримки на належному рівні продовольчої безпеки власної країни, а й вагомим джерелом експортних надходжень і, відповідно, також мірилом фінансової безпеки [14].

За даними Конференції ООН з торгівлі та розвитку (англ., United Nations Conference on Trade and Development, UNCTAD) у 2021 році світовий товарообіг склав 27,3 трильйона доларів США, при цьому сільгосппродукція разом із продуктами харчування складала 10% від загального обсягу (рисунок 1.1) [15, 16].



- Машини та транспортне обладнання
- Хімічна продукція
- Мінеральні продукти (включаючи нафту)
- Продукти харчування та сільгосппродукція
- Метали та вироби з них

Рисунок 1.1 – Структура світової торгівлі по групах товарів (2021 р)

Аналіз даних, наведених у [17], щодо обсягів світового виробництва та споживання зернових показав, що до 2021/2022 маркетингового року (МР) у світі відбувалося стале зростання виробництва та споживання зернових культур (рисунок 1.2). Незначний спад споживання у 2019/2020 МР пояснюється негативним впливом світової пандемії COVID-19, яка ускладнила логістику зернових та, відповідно, зменшила обсяги споживання у багатьох країнах світу [18].

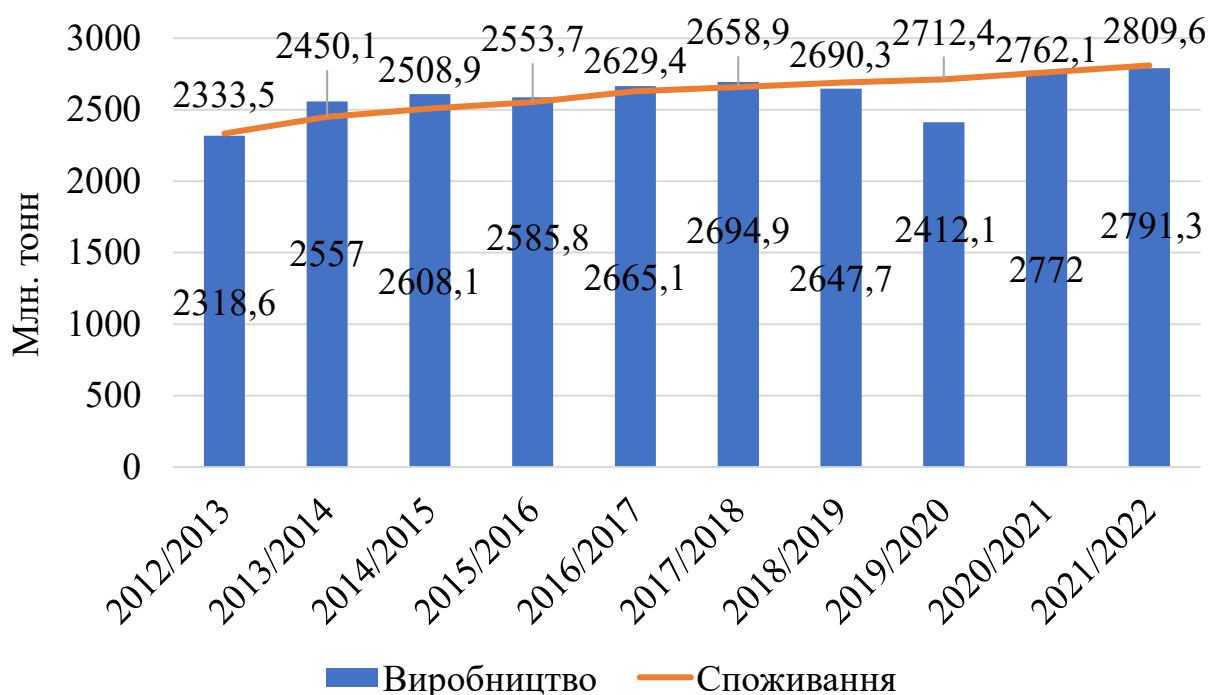


Рисунок 1.2 – Основні показники світового ринку зернових культур

Відповідно до даних ООН з продовольства та сільського господарства (англ., The Food and Agriculture Organization of the United Nations, FAO) за період з 2000 по 2022 рік, зернові культури сумарно складають абсолютну більшість від загального обсягу виробництва сільгосппродукції (рисунок 1.2) [19].

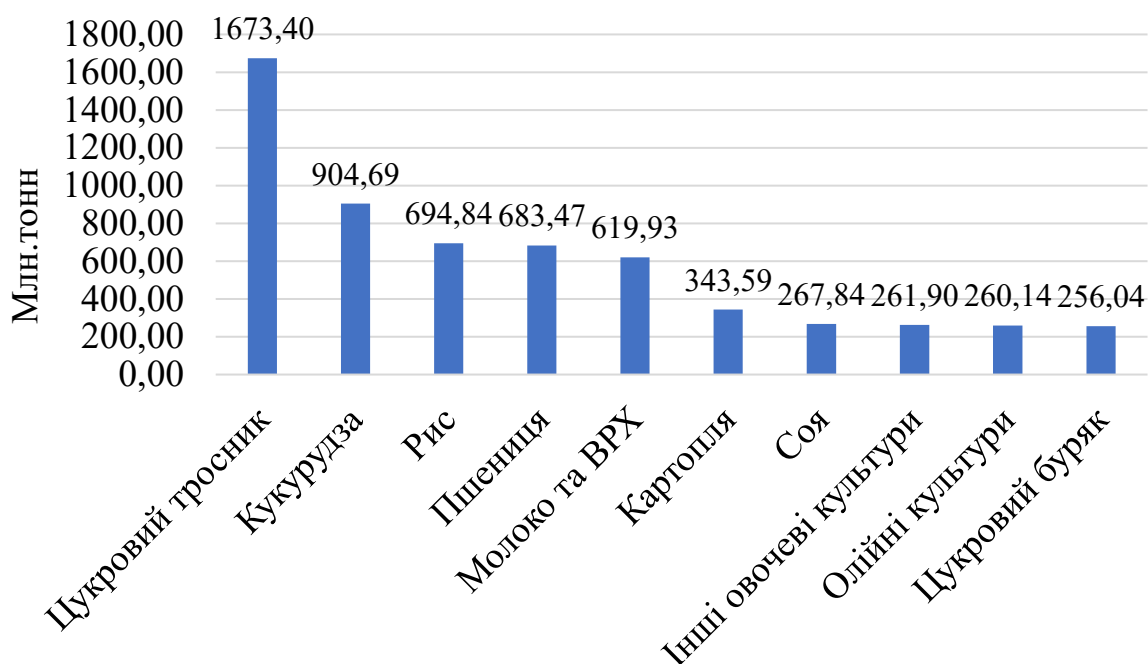


Рисунок 1.3 – Множина вироблених товарів (2000-2022 р)

Таким чином можна зробити висновок, що сільгосппродукція, зокрема зернові, є ваговою складовою світового товарного ринку. Її виробництво є основою розвитку світової економіки та забезпечення світової продовольчої безпеки.

Україна є одним з ключових гравців на ринку виробництва та постачання на світові ринки зернових культур. До 2021 року український агропромисловий комплекс забезпечував біля 4% світового виробництва зернових із загальним обсягом виробництва у 2021 році 85,7 млн. тонн [19, 20]. У сезоні 2021/2022 МР Україна займала сьоме місце серед виробників, та п'яте – серед експортерів пшениці (таблиця 1.1), обсяги постачання якої склали 19 млн. тонн на рік [21].

Таблиця 1.1 – Топ-5 країн-експортерів пшениці у 2021/2022 МР

№	Найменування країни	Обсяг експорту, млн. т.
1	рф	33,0
2	Європейський Союз	31,0
3	Австралія	27,5
4	Сполучені Штати Америки	21,9
5	Україна	19,0

В Україні агропромисловий комплекс традиційно розглядається як один із ключових для національної економіки [22]. Обсяг продукції сільського господарства у фактичних цінах за січень 2022 року становив 21,1 млрд. грн (січень 2021 року – 18,2 млрд. грн) [20].

Станом на 2021 рік аграрна продукція надавала більше 22% від загального обсягу експортних валютних доходів українського державного бюджету (таблиця 1.2) [23]. Продукція агропромислового комплексу складає вагомую частку експорту до країн Європейського Союзу – більше 18%, що в тому числі сприяє розвитку подальших інтеграційних процесів, що відзначено дослідниками у роботі [24].

Таблиця 1.2 – Найбільші групи товарів за обсягом валютної виручки у 2021 році

№	Група товарів	Валютна виручка (млрд. дол. США)	Частка, %
1	Чорні метали, руди, шлак	6,91	10,1
2	Металопрокат	15	22,0
3	Аграрна продукція	15,55	22,8
4	Мінеральні продукти	8,42	12,3
5	Жири та оливи	7,05	10,3
6	Машини, механічне та електричне обладнання	4,82	7,1
7	Інші товари	10,49	15,4
	Разом	68,24	100

Аналіз структури товарів агропромислового комплексу України з найбільшим обсягом експорту у 2021 та 2022 році, виконаний у [25], показав, що пшениця та кукурудза є лідерами серед експортованих зернових (рисунок 1.4). Ця ситуація в цілому зберіглася і після початку військової агресії.

В той же час, українська аграрна промисловість постійно стикається з рядом факторів, які негативно впливають як на врожайність, так і на логістику зернових вантажів, більшість з яких мала місце і до початку повномасштабної агресії [26]. Серед них слід виділити недостатні обсяги елеваторних потужностей, проблеми з перевезенням та зберіганням, а також диспропорції у провізній спроможності залізниць та переробній спроможності морських портів [27].

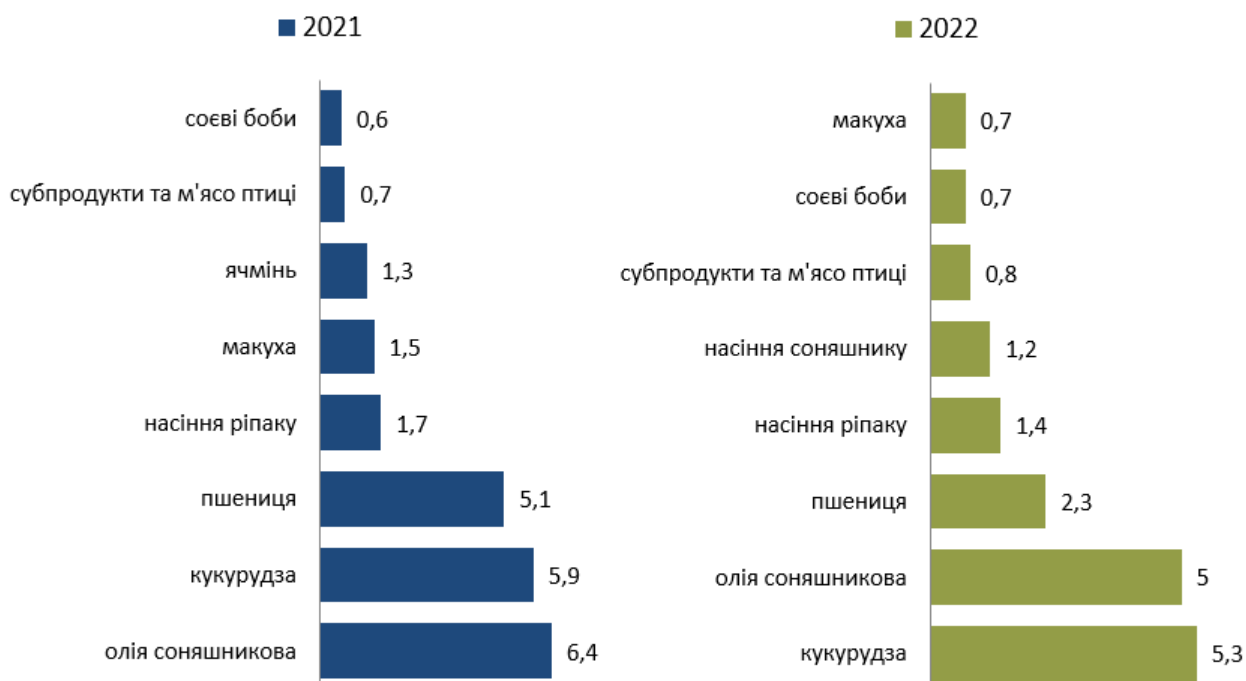


Рисунок 1.4 – Товари агропромислового комплексу України з найбільшим обсягом експорту у 2021 та 2022 р, млрд. дол. США. Джерело [25]

Після початку повномасштабної військової агресії проти нашої країни до перелічених проблем додалися часткова окупація територій, блокування роботи морських портів, руйнація транспортної та енергетичної інфраструктури та зміщення пріоритету на першочергове забезпечення перевезень військових вантажів [28]. Загроза зменшення або повного припинення постачань зернових з України спонукало світову спільноту до розробки компромісів з агресором, одним з яких стала угода щодо функціонування «зернових коридорів». Українські агропромислові та транспортні компанії також змушені були шукати альтернативні шляхи вивезення зернових на експорт з метою виконання своїх зобов'язань та запобігання світовій продовольчій кризі [29].

До початку бойових дій значні території земель агропромислового призначення, на яких відбувалося виробництво сільськогосподарських культур знаходилися на півдні країни, зокрема там було зосереджено виробництво пшениці (рисунок 1.5) [30].



Рисунок 1.5 – Виробництво пшениці по областях України. Джерело [30]

Аналіз відкритих ресурсів [31, 32], показав, що бойові дії після початку військової агресії, та в процесі її просування, значним чином відбуваються на територіях активної сільськогосподарської діяльності, що у свою чергу зменшило обсяг врожаю зернових (рисунок 1.6). Аналогічного висновку дійшли автори [33, 34], які відзначили, що бойові дії та порушення ланцюгів постачань значно ускладнюють вирощування та перевезення зернових вантажів.

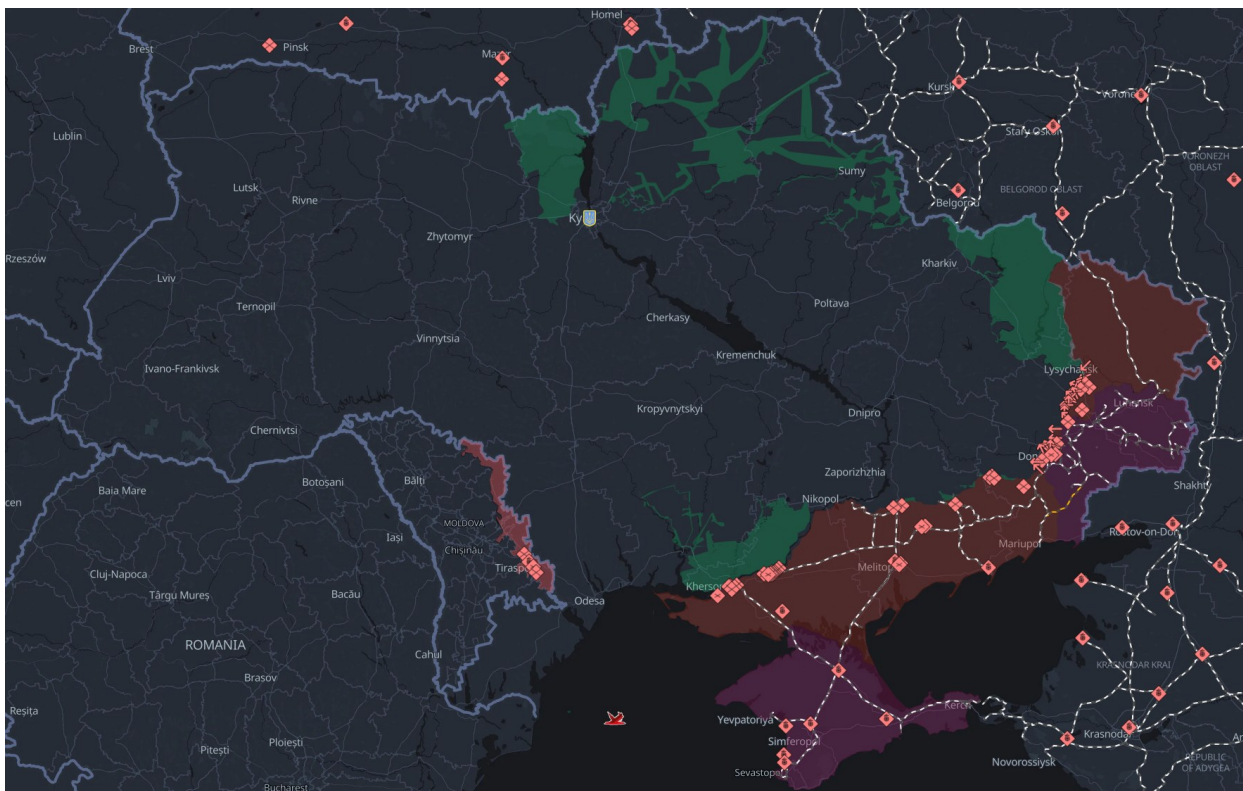


Рисунок 1.6 – Карта бойових дій станом на 02.01.2023. Джерело [30]

Зазначена ситуація призвела до значного скорочення доступних площ земель агропромислового призначення, а як наслідок – падіння врожаїв по всіх групах рослинної сільгосппродукції, в першу чергу – зернових (таблиця 1.3) [35].

Як можна побачити [36], зменшення врожайності по основних зернових культурах після початку повномасштабної агресії становить 22-30% від рівня 2021 року. Підвищення рівня збирання сої у 2023 році пояснюється переорієнтацією господарств на вирощування альтернативних видів продукції та через зростання попиту на світових ринках.

Подальше продовження військових дій та поступова втрата територій на півдні країни погіршують ситуацію із збиранням врожаю та проведенням подальших сільгоспробіт на території Запорізької та Херсонської областей. Це в свою чергу негативно впливає на обсяги виробництва та стан світових ринків сільськогосподарської продукції, а також ускладнює питання організації транспортного забезпечення та вивезення врожаю.

Таблиця 1.3 – Основні показники виробництва зернових культур за 2005-2023

р

Рік	Загальний врожай, тис. т.			
	Пшениця	Кукурудза	Соняшник	Соя
2005	18699	7167	4706	613
2006	13947	6426	5324	890
2007	13938	7421	4174	723
2008	25885	11447	6526	813
2009	20866	10486	6394	1044
2010	16844	11919	6772	1680
2011	22324	22838	8671	2264
2012	15761	20922	8387	2410
2013	22278	30900	11051	2774
2014	24121	28500	10134	3900
2015	26491	23330	11165	3761
2016	26000	27984	13627	4297
2017	26144	24685	12236	3905
2018	24633	35782	14165	4461
2019	28325	35763	15254	3616
2020	25167	29387	13110	2797
2021	32441	42100	16392	3493
2022	20176	26187	11329	3443
2023	22390	31030	12760	4743

Зважаючи на вищенаведену інформацію можна зробити висновок, що серед товарів агропромислового комплексу, які постачаються на експорт, зернові забезпечують більше 50% від загальних обсягів. Це вказує на те, що оптимізація процесів перевезення зернових на експорт здійснює значний вплив на формування валютних надходжень до державного бюджету країни, отже питання є актуальним.

## 1.2 Аналіз транспортного забезпечення перевезення зернових

Основним видом транспорту для перевезення зернових вантажів в Україні традиційно є залізничний. Відповідно до даних [20, 37], обсяги перевезень вантажів залізничним транспортом як до початку військової агресії, так і після неї, значно переважали автомобільний транспорт (рисунок 1.7).

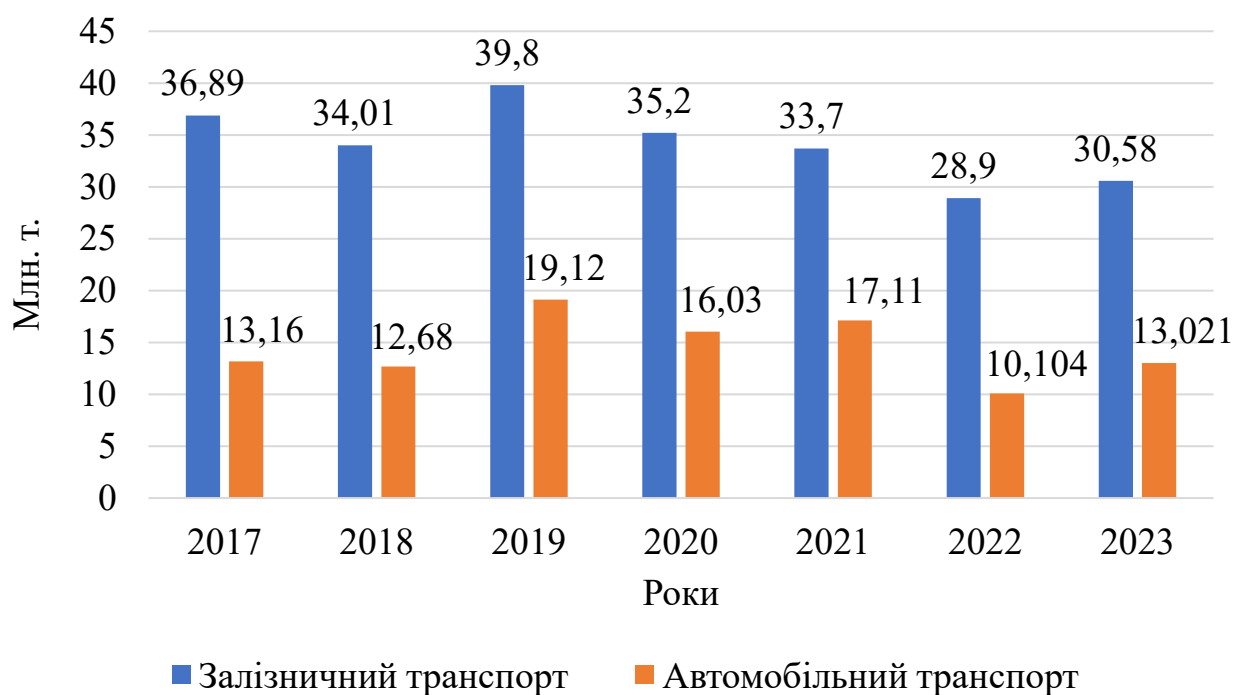


Рисунок 1.7 – Обсяги перевезень зернових вантажів залізничним та автомобільним транспортом

До лютого 2022 року основним напрямком перевезень зернових вантажів були морські порти, через які проходило більше 90% обсягу експорту [38]. Залізничний транспорт забезпечував підвезення 55-60% зазначених обсягів, автомобільний – 30-35% та 7-10% - частка річкового транспорту [39].

Після початку військової агресії обсяги перевезень зернових як автомобільним, так і залізничним транспортом зменшилися, проте перевага залізничного транспорту залишилася. Це відбулося не зважаючи на повітряні удари по енергетичній інфраструктурі та коліях залізничного транспорту, та значні ускладнення при перетині сухопутних кордонів на західних кордонах. Запорукою цього є базові характеристики залізниць – можливість перевозити великі обсяги вантажів з відносно невеликою собівартістю, стабільність та всепогодність [40, 41].

Після початку військової агресії було проведено ряд досліджень, присвячених змінам, що відбулися у ланцюгах постачань. Так у роботі [42] виділено наступні проблеми: тотальна зміна логістичних шляхів, дефіцит водіїв авто, орієнтація на роботу «з коліс», дефіцит автотранспорту в прикордонних районах. В якості шляхів

рішення пропонується часткове або повне відмовлення компаніями від власних логістичних підрозділів та передання логістики на аутсорсінг, що може покращити показники за рахунок централізації управління та економії на масштабах. Також наголошується на доцільності розширеного впровадження цифровізації та поглибленню співпраці підприємств у сфері логістики. Проте, у роботі не викладаються конкретні шляхи реалізації даних заходів, а також не беруться до уваги втрати, що понесуть компанії при ліквідації чи скороченні логістичних підрозділів. Також не відображено як вплине перехідний період на функціонування ланцюгів постачань агропродукції на світові ринки.

У дослідженні [43] проаналізовано експорт товарів з України, досліджено ризику та можливі порушення процесу транспортування внаслідок військової агресії. Обґрунтовано вплив, який ці порушення здійснюють на складську логістику та, відповідно, на рівень собівартості продукції. Проте у роботі не розглядаються потенційні шляхи скорочення чи нівелювання ризиків або технології організації перевізного процесу, які здатні зменшити негативний вплив на складську логістику.

### 1.2.1 Аналіз наукових досліджень технології транспортування зернових вантажів в Україні та за кордоном

Як вже зазначалося, у перевезеннях зернових вантажів в Україні були задіяні майже всі види транспорту за винятком авіаційного. При цьому кожен вид транспорту може використовуватися як окремо, так і як складова транспортно-технологічного ланцюга перевезення.

Автомобільний транспорт відіграє провідну роль при перевезенні зернових безпосередньо з полів до елеваторів, де відбувається накопичення вантажної партії для подальшого перевезення залізничним транспортом, або здійснює безпосереднє перевезення до морських портів. Відповідно [44], доставка зерна до морських портів автотранспортом є рентабельною на відстані до 200 км, проте у «високий» сезон та у випадку нестачі залізничного рухомого складу може виконуватися перевезення і на більші відстані. Однак, у дослідженні зазначені і проблеми з транспортуванням

зернових автотранспортом, зокрема висока собівартість, незадовільний стан автодоріг та черги у портах в очікуванні розвантаження. В той же час в якості шляху підвищення ефективності процесу транспортування зернових пропонується використовувати бімодальні технології, застосування яких вимагає наявності спеціальної інфраструктури. Наразі перелік станцій, де наявна така інфраструктура, обмежений [45], отже такий варіант не дає можливості забезпечити перевезення значного обсягу зернових вантажів.

Перевезення зернових вантажів залізничним транспортом традиційно організовувалися у вигляді маршрутів (відправницьких або ступінчастих) та повагонних відправок. Наразі рівень маршрутизації на мережі Укрзалізниці складає приблизно 60% [46, 47]. Відправницька маршрутизація є технологією організації залізничних перевезень, що широко використовується як в Україні, так і за кордоном [48, 49].

При перевезенні зернових вантажів відправницькі маршрути, як правило, організовувалися з елеваторів, потужність яких була достатньою для завантаження достатньої для організації маршруту кількості вагонів протягом однієї доби [50, 51]. Для елеваторів меншої потужності, де навантаження маршрутів за аналогічний період є неможливим, використовувалися ступінчасті маршрути, які консолідують зернові вантажі від різних відправників [52]. На окремих напрямках, особливо між великими елеваторами та морськими портами обертаються так звані «вертушки», або кільцеві маршрути, призначені для максимально швидкого перевезення зернових.

Морозов А. В. в роботі [53] дослідив питання управління кільцевими маршрутами, які складають більше половини від загальної кількості маршрутів. З метою оптимізації руху кільцевих маршрутів він застосував удосконалені математичні моделі для розв'язання (ГЗСЛ) і (КЗСЛ) - гамільтонової та кільцевої задач про сільського листоношу, які розширюють клас задач про листоношу. Було модифіковано метод Літтла, запропоновано правила розгалуження та спосіб пошуку нижньої оцінки, які дають можливість застосовувати метод для розв'язання КЗСЛ та інших задач маршрутизації. Запропоновано метод розв'язання КЗСЛ, який розвиває

класичний метод Літтла. Запропоновано наступну класифікацію задач оптимізації кільцевих маршрутів (рисунок 1.8). Однак дана робота розглядалася виключно у розрізі організації управління кільцевими маршрутами, результативність яких оцінювалася з технологічної точки зору. В той же час супутні витрати, в тому числі на запаси, залишалися необлікованими.

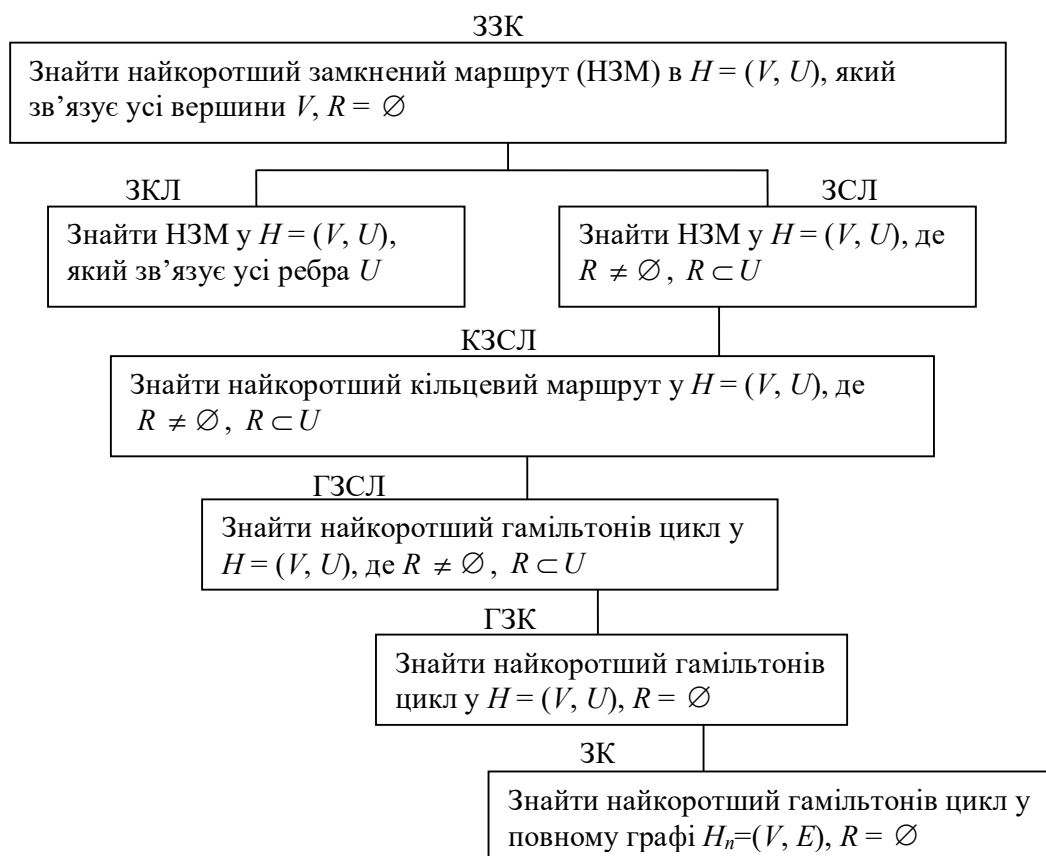


Рисунок 1.8 – Класифікація основних задач оптимізації замкнених маршрутів на транспортній мережі. Джерело [53]

ЗЗК – загальна задача комівояжера; ЗКЛ – задача про китайського листоношу; ЗСЛ – задача про сільського листоношу; ГЗСЛ – гамільтонова задача про сільського листоношу; КЗСЛ – кільцева задача про сільського листоношу; ГЗК – гамільтонова задача комівояжера; ЗК – задача комівояжера

Прокудін Г. С. у [54] врахував особливості транспортної інфраструктури та розглянув її вплив на маршрутизацію. Ним було розроблено теоретичні основи та практичні методи оптимального планування та маршрутизації вантажних перевезень у транспортних системах, які враховують обмеження та пропускні здатності їх

транспортних вузлів і комунікацій, незбалансованість обсягів вантажів, що перевозяться, взаємодію за різних комбінацій усіх видів транспорту у разі здійснення сумісних перевезень вантажу, розмірність розв'язуваних транспортних завдань.

Проведений комплекс досліджень дозволяє вирішити проблему оптимального управління вантажними перевезеннями шляхом використання матрично-мережевих моделей та методів здійснення перевезень вантажів у транспортних системах з урахуванням їх пропускних спроможностей. Запропоновано матрично-мережеву модель управління вантажними перевезеннями у транспортній системі України та відповідну інструментальну базу даних про характеристики її транспортних вузлів і комунікацій. Проте, запропонована модель не дає можливості врахувати витрати на вантажну масу в русі та запаси у пунктах відправлення та призначення, показники, які використовуються для оптимізації носять виключно технологічний характер.

Оскільки транспортний ринок як в Україні, так і у всьому світі, функціонує в умовах невизначеності умов та попиту, Зінченко І. В. у [55] розробив методику рішення задач оптимізації транспортних перевезень за схемою «постачальник – проміжні центри – споживачі» за умов нечітких вихідних даних. Було запропоновано методику використання генетичного алгоритму для рішення задач маршрутизації за схемою «від одного до багатьох» високої розмірності за умов нечітких вихідних даних. Розроблено методи побудови систем підтримки прийняття рішень у процесі управління внутрішньозаводськими перевезеннями. Наведено методику управління внутрішньозаводськими перевезеннями за умов нечітких вихідних даних. Вдосконалено методику використання генетичних алгоритмів у разі рішення комбінаторних задач високої розмірності. Аналогічні дослідження проводилися у [56, 57], де відмічено доцільність визначення впливу транспорту на запаси промислових підприємств, проте, рішень щодо цього питання не запропоновано.

Зазначені дослідження також було зосереджено виключно на вирішенні технологічних питань організації маршрутизації та впливу результатів зміненої технології організації та просування вагонопотоків на економіко-технологічні показники роботи транспортної системи в цілому. Проте безпосередньо питання зміни в організації роботи пунктів відправки вагонопотоку, в якості яких виступають

елеватори та питання впливу зміни технології на запаси в логістичних ланцюгах залишилося поза увагою.

Аналіз попередніх досліджень показав, що для перевезень різних видів вантажів використовувалися здебільшого класичні варіанти перевезення – залізничним або автомобільним транспортом, рідше – внутрішнім водним у внутрішньому сполученні та морським – при перевезенні на експорт. Проте, цей перелік не є вичерпним, оскільки економічні та технологічні трансформації викликали необхідність розгляду альтернативних можливостей транспортування зернових.

В період дефіциту спеціалізованого залізничного та автомобільного рухомого складу для перевезення зернових вантажів широко застосовувалися альтернативні технології перевезень, зокрема перевезення у контейнерах та біг-бегах [58, 59]. Так у [60] відзначається, що перевезення зернових в контейнерах є ефективною та ресурсозбережною технологією, яка сприяє підвищенню ефективності та зменшенню собівартості перевезень. Авторами досліджено можливості використання багатосекційних контейнерів для зернових та розроблено методику підбору відповідних транспортних засобів. Такі висновки підтверджуються у [61], де також відмічено, що в умовах військової агресії та блокади морських портів контейнерні перевезення сприяють пришвидшенню перетину державного кордону через західні залізничні переходи, а також порти, які залишилися діючими, оскільки контейнеризація значно скорочує час на виконання перевантаження. Встановлено [62], що експорт агропродукції в контейнерах через європейські морські порти хоч і є дорожчим за експорт через порти України, проте залишаються прийнятними (рисунок 1.9).

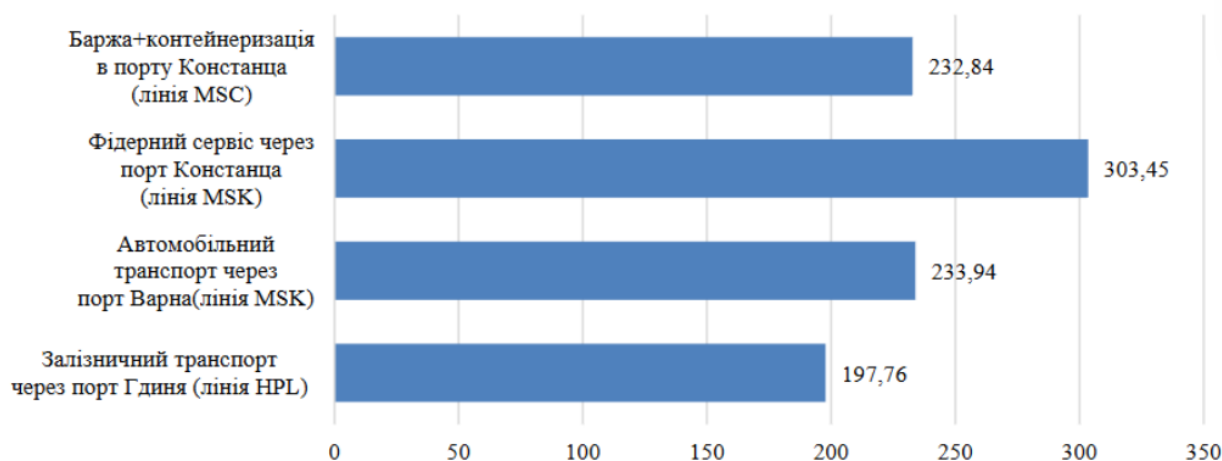


Рисунок 1.9 – Вартість альтернативних шляхів для експорту української агропродукції в контейнерах через європейські морські порти за видом транспорту, дол. США. Джерело [62].

Проте, слід зазначити, що контейнерні перевезення за своєю пропускнуою здатністю поступаються класичним технологіям перевезень – залізничним маршрутам або перевезенням автомобільним транспортом у напівпричепках. Як наслідок – у місцях відправки буде формуватися надлишкова вантажна маса, яка збільшить витрати на запаси, та на собівартість функціонування логістичного ланцюга в цілому, що не було враховано авторами зазначених досліджень.

Також слід зазначити, що з метою скорочення операційних витрат Укрзалізниця у 2019 році обмежила операційну діяльність по обслуговуванню елеваторів на тих станціях, які не мали можливості формувати маршрути, що призвело до зростання вартості логістики на 3-5 доларів США на тону [63]. До переліку тих, що мають таку можливість, було включено загалом 77 станцій, більшість яких (70 станцій або 91%) розташовані на Південно-Західній, Південній та Одеській регіональних філіях. Слід зазначити, що станом на 2022 рік саме Південно-Західна та Південна регіональні філії були лідерами щодо обсягів відвантаження зернових. Більшість елеваторів, які здатні завантажувати маршрути є власністю великих агропромислових компаній, які також володіють землями сільськогосподарського призначення, та є виробниками агропродукції [64].

Арсененко Д. В. відзначив, що існуюча мережа елеваторів може бути поділена на різні категорії, в залежності від їх виробничого потенціалу. Зокрема ті, що були побудовані за радянських часів не здатні забезпечити життєвий цикл зернових вантажів на елеваторі, а також забезпечити якість виконаних робіт, що призводить до утворення черг із автомобільного транспорту [65]. Проте, автором не розглядалося, що утворення черг також викликає створення надлишкової вантажної маси, яка зберігається як на елеваторі, так і «на колесах» - у кузовах автомобілів.

Таким чином можна стверджувати, що велика кількість досліджень була проведена для опису та розгляду окремих елементів технології організації та просування маршрутних поїздів. Проте, ці дослідження відображали технологічні аспекти організації маршрутів та в якості критерію ефективності також спиралися на технологічні показники, або їх економічні еквіваленти.

### 1.2.2 Аналіз наукових досліджень щодо впливу технології перевізного процесу на утворення запасів

Оскільки з точки зору логістичного управління, транспорт є ланкою інтегрованої логістичної системи, розглядати його ізольовано від інших процесів, що в ній відбуваються, нерационально. Найбільш очевидним є вплив стабільності, системності та технології організації перевезень на рівень запасів як у точках відправлення (елеваторах) так і у пунктах погашення (морські порти). Як стверджується у ряді досліджень [66-68], транспортні процеси різних видів транспорту є такими, що знаходяться під найбільшим впливом невизначеності через багатofакторний вплив та територіальну розосередженість.

Вплив логістичних процесів, перш за все транспортування, на рівень запасів розглянуто та систематизовано у [69]. Розглянуто особливості застосування різних систем управління запасами підприємства, що враховують логістичні процеси, їх переваги та потенційні можливості застосування. Запропоновано алгоритм вибору системи управління запасами, яка враховує особливості логістичних процесів, в тому числі транспорту, конкретного підприємства. На протилежність цьому у [70]

досліджується вплив вибору моделі управління запасами на планування логістичних процесів. Використовуючи змішану модель цілочисельного лінійного програмування визначені раціональні рівні запасів, рівні поставок та верхня і нижня межа перевірки запасу для кожного суб'єкта господарювання, а також потік продукції між ними. Проте, слід відзначити, що обидва дослідження більше зосереджені на дослідженні систем управління запасами, а взаємодія із транспортом та технології організації перевезень розглядаються тільки опосередковано, не досліджено вплив зміни технології на запаси в цілому.

Оскільки зміни рівня запасу викликають в тому числі необхідність відповідно планування складських потужностей, у [71] представлено модель змішаного цілочисельного лінійного програмування (MILP) для інтеграції планування складських приміщень, запасів та транспортування в багатоетапному ланцюзі поставок. Враховано вплив маршрутів постачання, проте не враховується технологія організації транспортування.

Вплив невизначеності, яка притаманна ланцюгам постачань на запаси досліджувалися у [72]. Відзначено, що на автотранспорті для усунення порушень, що є її наслідками, менеджери витрачають до 40% всього часу, що припадає на забезпечення логістичних процесів. Проаналізовано причини виникнення невизначеності, та як наслідок – ризиків у ланцюгах постачань. Запропоновані перспективні напрямки подальших досліджень щодо їх зниження та зменшення впливу на запаси. Проте дослідники розглядали невизначеність всього логістичного ланцюга в цілому, без розділення по видах діяльності, зокрема і транспортування, що може стати на заваді визначенню «вузьких місць» ланцюга постачань та їх подальшій ліквідації.

Необхідність сукупної оцінки процесів транспортування, зберігання та інфраструктурно-складських рішень у сільськогосподарському секторі розглядається у ряді робіт [73-75]. Відзначається, що це здійснює позитивний вплив на екологічні аспекти, сприяє сталому розвитку та запобіганню втрат та псування продукції. Проведені дослідження показали, що існує залежність між цими показниками та часом транспортування, рішеннями щодо розміщення складської

інфраструктури та додержання технології підготовки вантажу до перевезень на різних етапах ланцюга постачань сільгосппродукції. Запропоновано моделі, які пов'язують між собою зазначені фактори. Однак, слід зауважити, що показниками, які враховуються відносно транспорту є вид транспортного засобу та час транспортування, а також вторинні фактори – пакування продукції [75], проте технологія організації перевізного процесу не враховується. Окремо слід відзначити [76], де аналізується вплив технології перевезень зернових вантажів на вартість перевезень зернових, з урахуванням військової агресії. В роботі в числі інших розглянуто оперативну роботу залізниць, зокрема роботу диспетчерського апарату, як невід'ємну складову, що також впливає на собівартість перевезень. У дослідженні не сформульовано залежності собівартості перевезень від перелічених критеріїв, що робить неможливим використання запропонованих рішень у представленому в дослідженні вигляді.

Авторами [77] було відмічено, що у сучасних дослідженнях недостатня увага приділяється рівням планування перевезення зернових вантажів, зокрема рішенням щодо вибору суб'єктів господарювання, які задіяні в процесі перевезень, маршрутизації тощо. Пропонується розглянути варіації мультимодального перевезення зернових вантажів з метою прискорення проходження «продовольчої милі» та запобігання псуванню сільськогосподарських вантажів. При цьому зазначається, що попри наявні дослідження з організації таких перевезень у розвинутих країнах (США, країни ЄС), залишається багато питань щодо їх реалізації у країнах з обмеженим техніко-технологічним потенціалом, до яких можна віднести і Україну.

### 1.2.3 Аналіз досвіду інших країн з організації та технології перевезень зернових вантажів та їх впливу на запаси

Проблеми з транспортуванням зернових вантажів залізничним транспортом та методи і технології щодо їх вирішення активно досліджуються у більшості країн світу, зокрема у тих, які є активними експортерами. При цьому досліджуються як

питання організації перевезень вантажів, так і повернення та подальшого розподілу порожніх вагонів.

В [78] проведено огляд існуючих технологій організації завантажених та порожніх вагонопотоків, а також проаналізовано існуючі моделі, за допомогою яких можливо проводити корегування. Виділено типи взаємодій, що існують між рішеннями щодо маршруту, формування та розподілу порожніх вагонів, а також визначено потенційні області для майбутніх досліджень. Проте, через обмеження, пов'язані з обчислювальними потужностями, розглянуті моделі не враховують впливу окремих факторів, зокрема змінної вартості оренди рухомого складу та коливання ціни на виконання вантажних операцій на елеваторах та обслуговування в морських портах.

Частково ці недоліки було усунуто у [79], де авторами проаналізовано взаємозв'язки та вплив між витратами на перевезення та вартістю робіт у пунктах відправлення та призначення. Встановлено залежність між вартістю транспортування залізницями у порівнянні із річковими баржами, враховано вплив вартості обробки вантажів в морських портах Мексиканської та Північної Затоки на технологію виконання перевезень. Визначено вплив цих факторів на показники затримки залізничних вагонів та співвідношення місткості складів та обсягів зберігання. Однак розроблені залежності не враховують вартість фізичних запасів у пунктах відправлення, проміжних та портових пунктах зберігання.

Проведений у [80] аналіз технології функціонування залізниць США показав, що основні залізниці (ті, що відносяться до 1 класу) вже більше 10 років тому перейшли на роботу з поїздами, а не з окремими вагонами. При цьому на мережі залізниць обертаються поїзди unit train, які складаються з 40-75 вагонів, та shuttle train, які складаються з 76-110 вагонів та рухаються за розкладом. Формування цих поїздів для залізниць I класу здійснюють або залізниці менших класів, або окремі вантажовідправники. Значна частка цих маршрутів призначена для забезпечення транспортування зернових вантажів від елеваторів до морських портів.

У [81] виконано дослідження функціонування елеваторів США та забезпечувальної транспортної системи, сформовано ряд моделей функціонування

елеваторного комплексу в умовах застосування залізничної маршрутизації. Для порівняння маршрутного та звичайного залізничного сполучення в цій статті представлено три різні моделі. Перша модель – модель часу, визначає час, необхідний для транспортування зерна з ферми до пункту призначення (наприклад, експортного елеватора). Друга модель, яка називається «моделлю інженерних витрат», визначає сукупні змінні витрати на транспортування зерна з ферми до експортного елеватора. Третя модель, яка називається «моделлю пропускної здатності», визначає максимально досягну пропускну здатність (тобто пропускну здатність) залізничної мережі як функцію попиту на залізничні перевезення та відсотка вагонів у мережі, що переміщуються човниковим та звичайним транспортом. Результати кожної моделі, представлені у дослідженні, показують, що човникове залізничне сполучення пропонує значні переваги порівняно з традиційним сполученням. Проте, аналізуючи наведені розробниками моделі, можна відмітити, що вартість запасів на елеваторі не врахована у моделі витрат, яка спирається в основному на транспортні витрати.

Досліджувалося і впровадження сучасних технологій, таких як створення геоінформаційних систем залізничного транспорту та розподілу потоку зернових вантажів між окремими залізничними лініями [82]. Також розглядалася доцільність впровадження більш потужних локомотивів та важчих вантажних вагонів для перевезення зернових вантажів. Модель враховувала різні сценарії обслуговування, та встановила, що переваги нової технології на Canadian Pacific більш очевидні, ніж на Canadian National, через круті схили та довгі поїзди, пов'язані з операціями Canadian Pacific. Протягом терміну служби нової технології може бути заощаджено приблизно 260 мільйонів канадських доларів. Додаткові переваги можна отримати, виконавши додаткову модернізацію залізничної інфраструктури. Дослідження довело доцільність впровадження більших маршрутів, проте не визначало, як це впливає на запаси. Аналогічних висновків для експорту сої було отримано у [83].

Дослідження [84, 85] розглядали питання організації перевезень зернових вантажів у Бразилії, що також є однією з провідних країн-експортерів. Автори розглянули мультимодальний ланцюг перевезень зерна та сої. Встановлено, що біля

60% від загального обсягу перевезень виконується автомобільним транспортом, 30% - залізничним та 10% - водним, до якого відноситься зокрема річковий транспорт. Запропоновані моделі дозволяють розглянути різні маршрути транспортування з поєднанням різних видів транспорту, у різних конфігураціях. Дослідження показали, що для забезпечення зростаючого обсягу виробництва зернових необхідне розширення ролі залізничного транспорту, зокрема розвиток залізниці Феррогран – це проєкт, метою якого є з'єднання Сінопа в штаті Мату-Гросу з Ітайтубою в штаті Пара. Його реалізація дасть можливість перевести на залізницю вантажопотік, який наразі переміщується автотранспортом по дорозі BR-163. Очікується, що завдяки залізниці Феррогран вартість перевезень знизиться на 30-40%. Запропоновані моделі дають можливість виявити найбільш привабливі території для розвитку сільського господарства з метою зменшення витрат та зниження шкідливих викидів в атмосферу.

Таким чином можна стверджувати, що проаналізовані дослідження розглядали різні аспекти впливу технології транспортного обслуговування на інфраструктуру сільського господарства, елеватори, формування вартості зернових вантажів. Проте, вплив технології організації перевезень на формування запасів та інфраструктури їх зберігання досліджено недостатньо. Отже, питання дослідження формування запасів в залежності від технології виконання залізничних перевезень є актуальним.

### 1.3 Аналіз сучасних інструментів досліджень ланцюгів постачань зернових вантажів та технологічних процесів перевантажувальних пунктів

Для повноцінного проведення подальшого аналізу технології організації перевезення зернових вантажів, формування ланцюгів постачань та запасів, доцільно попередньо розглянути інструменти, які використовуються для подібних досліджень та реагування на виклики часу.

Після світової фінансової кризи 2008 року та глобальної епідемії COVID-19 у 2020 році, які викликали глобальну нестабільність та порушення функціонування ланцюгів постачань, в тому числі сільськогосподарських вантажів, існуюча

парадигма управління ланцюгами постачань зазнала фундаментальних змін [86]. В цей період традиційні підходи до розрахунку рівнів та формування запасів, які до цього моменту базувалися на статистичних розрахунках, поступаються місцем динамічним розрахункам, що базуються на комп'ютерних моделях та складних адаптивних мережах. Відповідно [87], в сучасному світі швидкість відгуку ланцюга постачань є пріоритетною перед володінням логістичними активами, наявністю резервів інфраструктури та потужності.

У дослідженні [88] інструментом симуляції руху зернових вантажів від поля до споживача є цифрові двійники. Це дає можливість моделювання роботи елеваторів у періоди пікового навантаження та сплеску попиту. Моделювання відбувається із використанням супутникових даних, отриманих із загальнодоступних, або платних ресурсів [89, 90], що у поєднанні із об'єктними моделями дає можливість прогнозувати обсяги зернових вантажопотоків ще до моменту збору врожаю. Аналіз звітів [19] дозволяє стверджувати, що точність подібних прогнозів може бути основою для планування глобальних товарних потоків зернових вантажів, а дані, проаналізовані у [91] підтверджують, що інтеграція зазначених даних підвищує оборотність запасів на 20-30%.

Ключовим фактором в управлінні якістю на етапі 2023-2024 стало впровадження інтернету речей (IoT). Воно полягає у встановленні датчиків, які передають інформацію до єдиної інформаційної системи, які дозволяють оперативно змінювати пріоритетність розвантаження: партії з ризиком псування спрямовуються на переробку першочергово [92]. У цьому дослідженні ASCM зазначається, що перехід до концепції «Just-in-Time 2.0» став можливим саме завдяки такій об'єктній інтеграції, де транспортна одиниця сама надає інформацію про свій стан. Впровадження такої технології в перспективі робить можливим подальший перехід до концепції «розумних запасів», за якої на базі інтеграції даних про просування матеріального потоку з'являється можливість прогнозування та скорочення всіх видів запасів у ланцюгу постачань.

Інструментом, який здатний поєднувати всі вищеперелічені фактори, та враховувати вплив специфічних умов функціонування агрологістичних систем є

об'єктне (об'єктно-орієнтоване) та агентне моделювання. На відміну від традиційного моделювання логістичних процесів, об'єктний підхід дозволяє представити кожен одиницю вантажу або транспортний вузол як автономний інтелектуальний агент із власним набором властивостей. Аналіз досліджень [93-95] дозволяє стверджувати, що такий підхід дозволяє створювати високорівневі абстракції складних багатоканальних зернових потоків, кожен з яких самостійно реагує на зміни зовнішнього середовища чи умов. В свою чергу це є передумовою для агентного моделювання (Agent-Based Modeling), де кожна партія зернових вантажів може «приймати рішення» про маршрут перевезення, в залежності від завантаженості елеватора чи перевантажувального терміналу. Дослідження [96-99] показали, що об'єктна декомпозиція дозволяє створювати стійкі цифрові двійники, які здатні до самоорганізації при виникненні збоїв чи порушень у роботі ланцюга постачань. Такий підхід трансформує управління запасами з реактивного процесу на проактивний, з можливістю прогнозування дефіциту потужностей ще до його виникнення.

Таким чином можна стверджувати, що об'єктно-орієнтоване та агентне моделювання є методологічною основою сучасних досліджень як ланцюгів постачань, так і інших процесів. У [100] зазначено, що використання агентного моделювання дає можливість симулювати поведінку потоків зернових вантажів в морських портах з урахуванням стохастичних факторів, таких як затримка рухомого складу або відмова обладнання. Такий підхід також дозволяє врахувати вплив «запасів у дорозі», що демонструється у [101]. Об'єктне моделювання ланцюга «від ферми до порту» дозволяє визначити критичні точки, де відбувається втрата якості зерна, інтегруючи показники температури та вологості безпосередньо в об'єкт моделювання. Це дає можливість логістичним системам автоматично корегувати маршрути перевезення у разі виникнення ризиків, вище допустимого рівня. Аналогічно у [102] розглянуто моделювання роботи логістичного ланцюга постачання залізничного концентрату з України до ЄС. Моделювання було реалізовано у середовищі Any Logic Research Edition з Java SE, оскільки цей

інструментарій дозволяє одночасно поєднувати дискретно-подійний та агентно-орієнтований підходи в симуляції (рисунки 1.10).

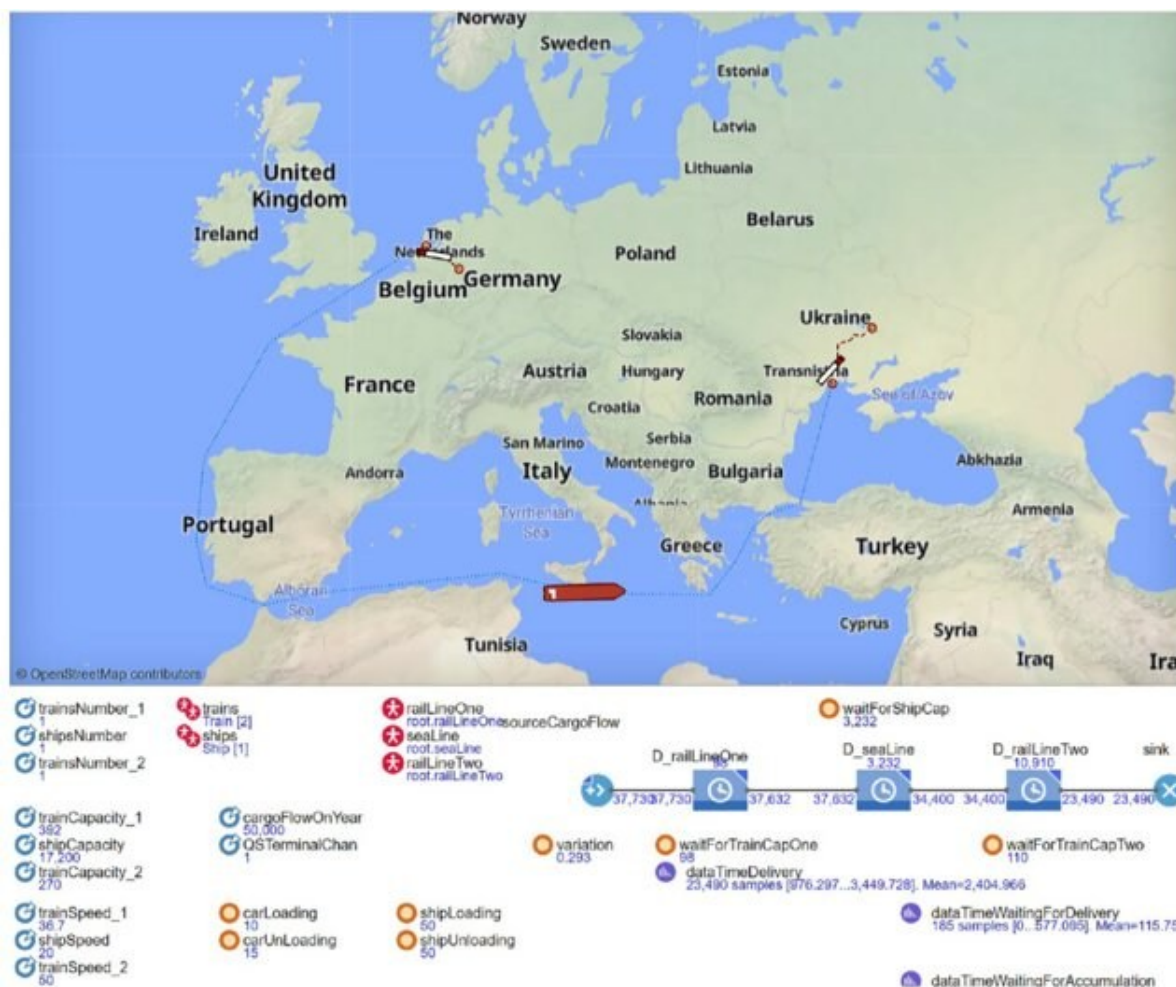


Рисунок 1.10 – Основне вікно програми [102]

Поєднання таких підходів дозволило визначити комплексні раціональні показники роботи ланцюга із врахуванням можливих порушень та затримок. Використане середовище дає можливість візуалізації процесу для спрощення та наочності сприйняття.

#### 1.4 Висновки по розділу 1

1. Сільськогосподарська продукція, зокрема зернові, є вагомою складовою світового товарного ринку, що формує базис глобальної продовольчої безпеки. Україна є одним із найбільших країн-експортерів, яка до 2021 року забезпечувала

близько 4% світового виробництва зернових, займаючи 5 місце серед експортерів пшениці станом на 2021/2022 м.р. Зернові є одним із основних пунктів експорту України, аграрна продукція забезпечувала 22,8% валютних надходжень України у 2021 році, при цьому пшениця та кукурудза є лідерами експорту.

Початок повномасштабної військової агресії РФ призвів до блокування морських портів, руйнації інфраструктури та скорочення доступних посівних площ. Наслідком цього стало скорочення врожайності основних культур на 22-30%. Не зважаючи на зазначені труднощі, виробництво та експорт зернових залишається критично важливим для України, оскільки забезпечує вагомому частку надходжень до державного бюджету, що підтверджує актуальність та важливість дослідження та оптимізації процесів перевезення сільгосппродукції.

2. Для забезпечення перевезень зернових на експорт використовуються різні види транспорту, основним із яких є залізничний, що пояснюється його можливостями перевезення великих обсягів вантажів з відносно невеликою собівартістю. До 2022 року понад 90% експорту зернових здійснювалося через морські порти, при цьому залізниця забезпечувала підвезення 55-60% обсягів, автомобільний транспорт – 30-35%, річковий – 7-10%.

Автомобільний транспорт відіграє провідну роль на коротких відстанях (до 200 км), та забезпечує перевезення зернових від місця збирання то елеваторів, тоді як залізничний використовується для перевезення значних обсягів до портів. Організація перевезень залізничним транспортом традиційно здійснюється маршрутними та повагонними відправками, з рівнем маршрутизації на мережі «Укрзалізниці» близько 60%. Основна частка маршрутів – відправницькі, які формуються на елеваторах достатньої потужності, решта – ступінчасті, що консолідує вантажі від менших відправників.

3. Аналіз наукових праць дослідників, які вивчали питання організації та оптимізації перевезення вантажів маршрутами показало, що вони здебільшого зосереджені на питаннях оптимізації маси та довжини, використання рухомого складу або зменшення собівартості перевезень. При цьому питання формування товарних запасів як на елеваторах у місцях зародження вантажопотоків, так і на

шляху прямування та у морських портах. Також недостатньо дослідженим залишилося питання впливу технології виконання перевезень на записи протягом всього ланцюга.

4. На сучасному етапі розвитку існуюча парадигма управління ланцюгами постачань зазнала змін, що стимулювало численні дослідження нових інструментів. Традиційні підходи до розрахунку рівня запасів поступаються місцем динамічним розрахункам на основі комп'ютерних моделей та адаптивних мереж.

Методологічною основою сучасних досліджень є об'єктно-орієнтоване та агентне моделювання, що дозволяє симулювати поведінку потоків зернових в портах із врахуванням «запасів в дорозі». Використання програмного забезпечення, що поєднує дискретно-подійний та агентно-орієнтований підходи (наприклад, AnyLogic), дозволяє визначити комплексні раціональні показники роботи ланцюга з урахуванням затримок та порушень.

Таким чином, питання підвищення ефективності транспортно-технологічних систем з експорту зернових у змішаному сполученні є актуальною науковою задачею, яка остаточно не вирішена. В якості інструменту доцільно використати об'єкте моделювання, що дозволяє ефективно проводити дослідження в умовах дії випадкових факторів.

## РОЗДІЛ 2

### СУЧАСНИЙ СТАН І ПЕРСПЕКТИВНІ НАПРЯМКИ РОЗВИТКУ ТРАНСПОРТНО-ТЕХНОЛОГІЧНИХ ЛІНІЙ ДОСТАВКИ ЗЕРНОВИХ

#### 2.1 Аналіз структури експортних вантажопотоків зернових і зернобобових в Україні

Підвищення ефективності та оптимізація параметрів транспортної системи України залишаються першочерговими завданнями в умовах зростання виробництва в аграрному та продовольчому секторах вітчизняної економіки. Виробництво в українському аграрному секторі протягом останніх двох десятиліть зростає і наразі становить значну частку в загальному товарному обсязі та зовнішньоекономічному обігу.

Отже, за підсумками 2021 календарного року спостерігався найбільший в історії України обсяг експорту пшениці та макаронних виробів – понад 20 млн. тонн. Обсяг заморожених ягід (а також фруктів) становив близько 76 тис. тонн [18, 103].

Враховуючи останні події, пов'язані з агресією російської федерації проти України, окупацією південних регіонів і блокуванням морських торговельних портів, економіка України стикається з труднощами у функціонуванні транспортної системи та реалізації зовнішньоекономічних зв'язків. Особливої складності набувають глобальні процеси постачання виробленої в країні сільськогосподарської продукції на експорт. Світова спільнота вже зіткнулася з погіршенням ситуації, пов'язаної з продовольчою кризою в країнах Африки та Азії. Тому сьогодні існує науково-прикладна проблема оптимізації параметрів національної транспортної системи з метою забезпечення сталого експортного потенціалу українського аграрно-промислового комплексу.

Одним із завдань вирішення цієї гострої проблеми є забезпечення стабільного функціонування національної транспортної системи України у воєнних і післявоєнних умовах. У більш детальному розумінні йдеться про перерозподіл переробних і перевантажувальних потужностей морського, залізничного та

транспортного виробничих комплексів. Однак, враховуючи кардинальні зміни напрямків і потоків вантажів з плином часу, конкретні питання можна розв'язати лише шляхом належного наукового та системного вивчення ситуації.

Перспективою застосування результатів відповідних досліджень до практичної діяльності транспортного комплексу України є підвищення відмовостійкості транспортної системи та аграрно-промислового комплексу. Для української економіки транспорт є підсистемою збуту кінцевої продукції. З наукової точки зору, отримані результати є подальшим розвитком теорії транспортних процесів і систем з точки зору формування транспортних потоків та управління пропускнуою здатністю елементів транспортної системи.

Згідно з даними на травень 2022 року [104], загальний обсяг зовнішньої торгівлі пшеницею в 2021/22 році становить 19,99 млн. тонн, що на 3,5 млн. тонн менше, ніж у попередньому сезоні. При цьому за останні 10 років (тобто з МР 2011/12) показник зріс на 6,38 млн тонн (+47%).

Відповідно до офіційних статистичних даних [104], рейтинг найбільших країн-експортерів пшениці у 2021/22 МР є таким (рисунок 2.1). Україна входить до п'ятірки найбільших експортерів зерна пшениці, несуттєво поступаючись США. Основними імпортерами зернових і бобових з України на початок 2022 року є країни Азії, Тихоокеансько-Азійського регіону, Африки, Близького Сходу (рисунок 2.2) [90].

Слід зазначити, що всі експортери розташовані на значній відстані від України, що ще раз підтверджує важливе місце України на глобальному ринку виробництва та постачання зерна пшениці.

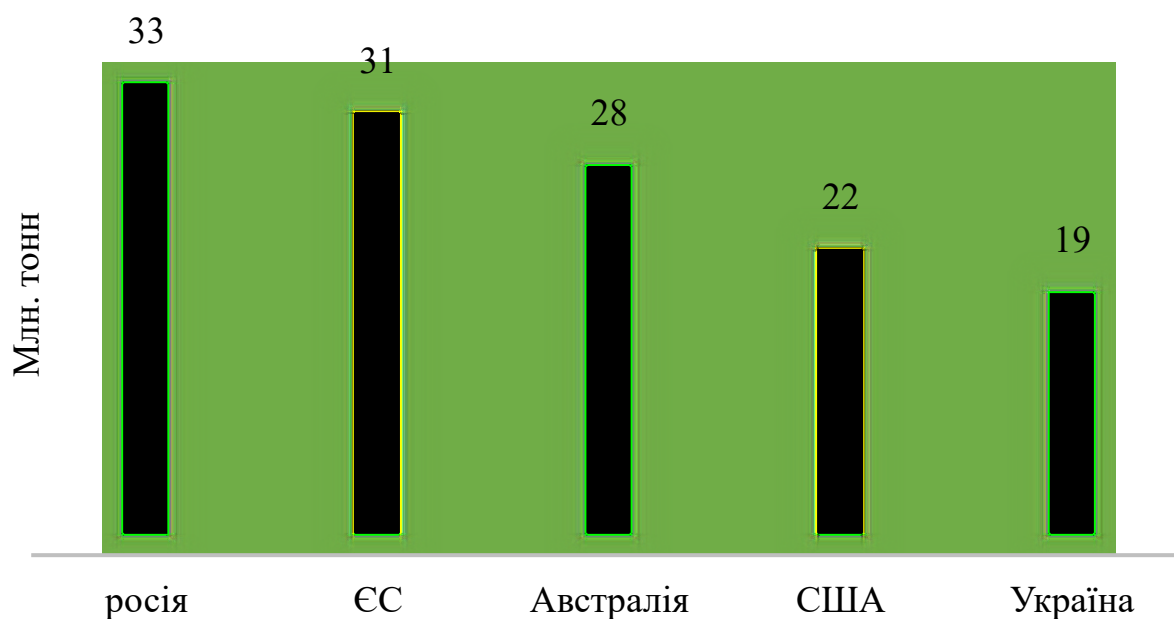


Рисунок 2.1 – Рейтинг експортерів зерна пшениці за 2021/22 маркетинговий рік,  
МЛН ТОНН

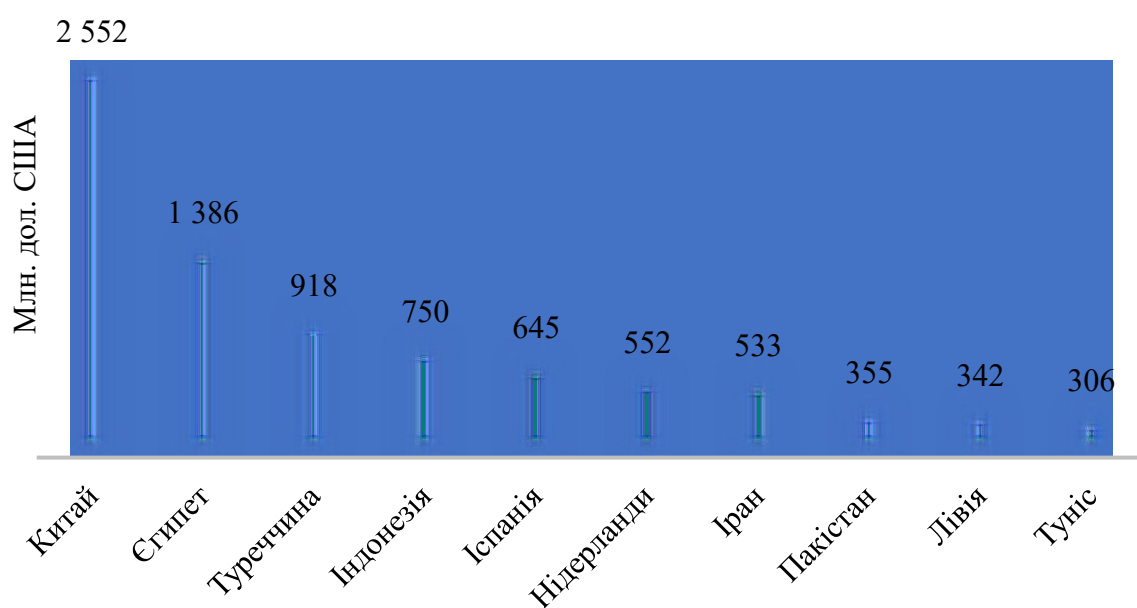


Рисунок 2.2 – Рейтинг імпортерів продукції зернових та зернобобових України за  
2021/22 маркетинговий рік, млн дол. США

У таблиці 2.1 наведено детальну статистику структури українського експорту зернових, бобових та борошна за 2022/2023 та 2021/2022 маркетингові роки [105]. Більша частка припадає на зерно кукурудзи та пшениці. Разом із тим, достатньо експортується зерна ячменю та жита.

Таблиця 2.1 – Структура виробництва та постачання основних зернових та бобових культур в Україні за 2021/2022 та 2022/2023 маркетингові роки

Товарна група	2022/2023 МР		2021/2022 МР	
	Всього	в тому числі: у січні 2023	Всього	в тому числі: у січні 2022
Зернові та зернобобові, всього	22761	15	33198	725
Пшениця	8411	0	16102	200
Ячмінь	1626	0	5196	0
Жито	12,5	0	121,5	0,2
Кукурудза	12639	15	11536	522
Борошно пшеничне, тис. тонн	65,6	0	58,6	0,1
Борошно інше, тис. тонн	3,4	0	0,9	0
Борошно разом, тис. тонн у перерахунку на зерно, тис. тонн	69	0	59,5	0,1
Експорт разом (зерно + борошно)	22853	15	33278	726

Урожай зернових та зернобобових культур у різних регіонах України на 1 грудня 2021 року, ранжування регіонів України за обсягом виробництва відповідних культур наведено в таблиці 2.2, на рисунках 2.3 та 2.4 [106].

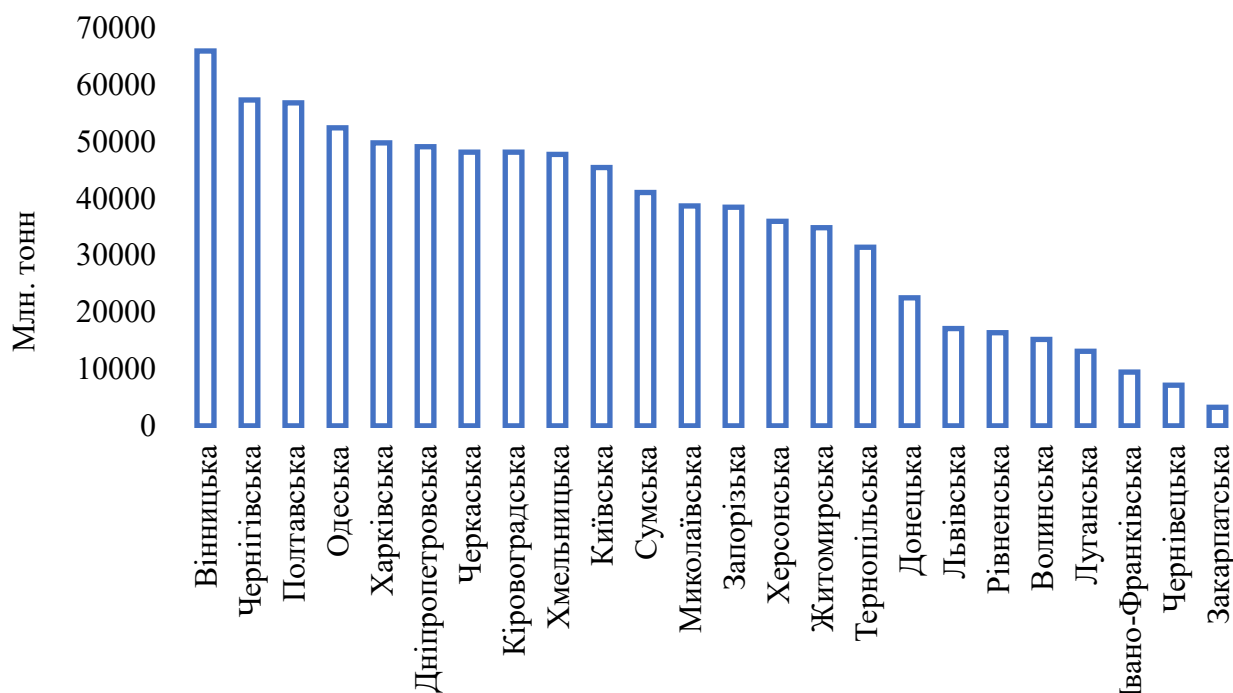


Рисунок 2.3 – Рейтинг виробників зернових та бобових за регіонами України за маркетинговий рік 2021/22 (млн тонн)

Таблиця 2.2 – Рейтинг виробників зернових та бобових за 2021/22 маркетинговий рік за регіонами України (тис. ц)

Область України	Обсяг виробництва, тис. ц.	Область України	Обсяг виробництва, тис. ц.
Вінницька	65956,5	Запорізька	38469,1
Чернігівська	57334,1	Херсонська	35995,4
Полтавська	56837,0	Житомирська	34862,2
Одеська	52452,0	Тернопільська	31404,8
Харківська	49768,4	Донецька	22540,9
Дніпропетровська	49130,4	Львівська	17139,2
Черкаська	48151,6	Рівненська	16396,0
Кіровоградська	48133,7	Волинська	15232,4
Хмельницька	47774,2	Луганська	13098,6
Київська	45431,9	Івано-Франківська	9462,6
Сумська	41064,7	Чернівецька	7128,0
Миколаївська	38701,0	Закарпатська	3238,9

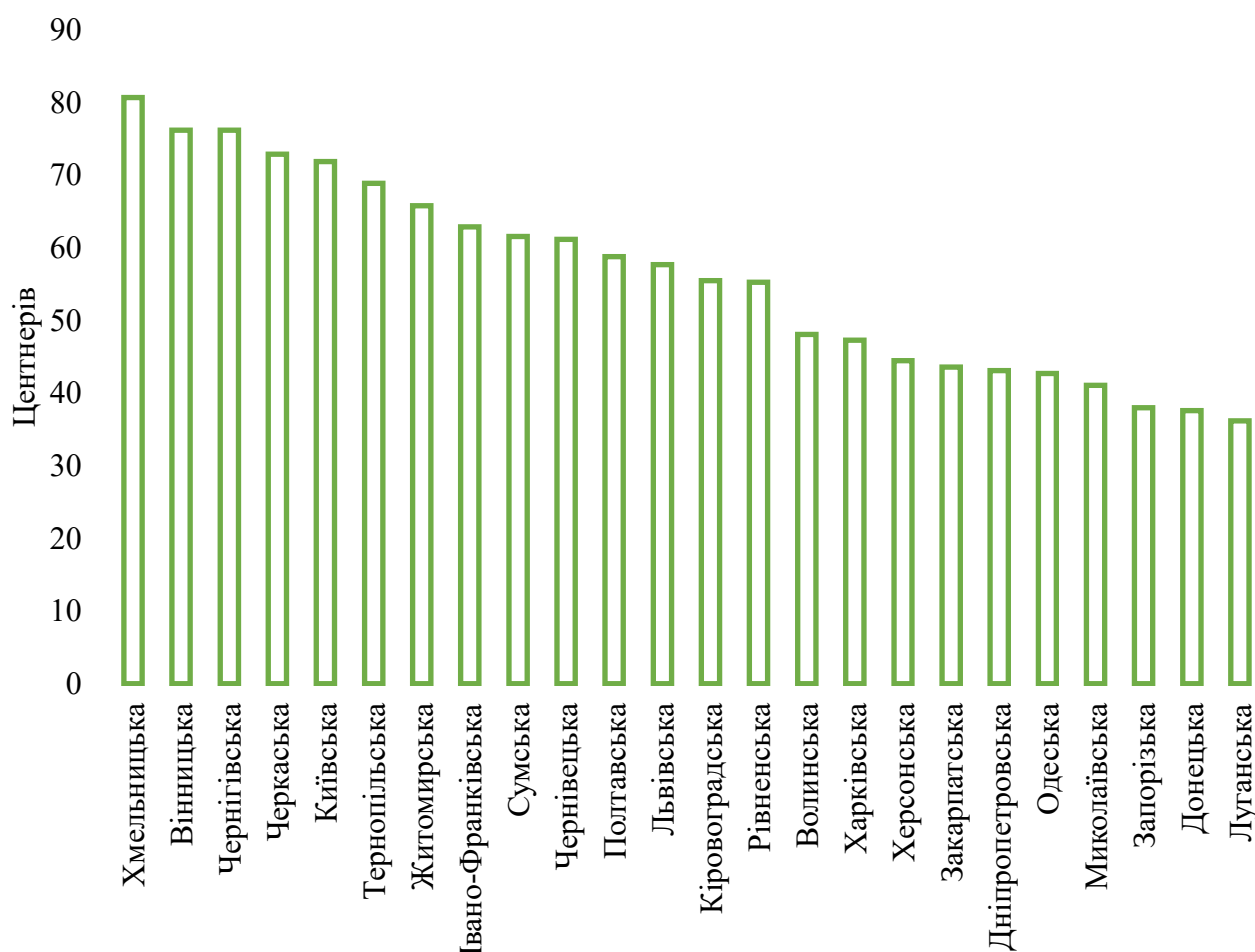


Рисунок 2.4 – Показники продуктивності виробників зернових та бобових за 2021/22 МР по регіонах України, центнерів на 1 га посівної площі

Також існує значна неоднорідність у класифікації зерна за розміром розподілу (автомобілі), що здебільшого пов'язано з впливом місцевих умов щодо походження зернових вантажопотоків та доступності транспорту зерна агротрейдерами. Стан залізничної інфраструктури характеризується тим, що кількість залізничних станцій, відкритих для місцевого вантажного транспорту, різко скоротилася, що опосередковано відображається по обсягу відправлення цих вантажів між дирекціями залізничних перевезень. Аналіз обсягів експорту зернових та бобових українською залізницею показав, що найбільші обсяги на початку 2022 року припадали на Південно-Західну та Південну регіональні філії (рисунки 2.5 та 2.6) [107].

Зважаючи на географічне розташування, відповідно змінюються і порти, через які відбувається подальше перевезення на експорт (рисунок 2.7).

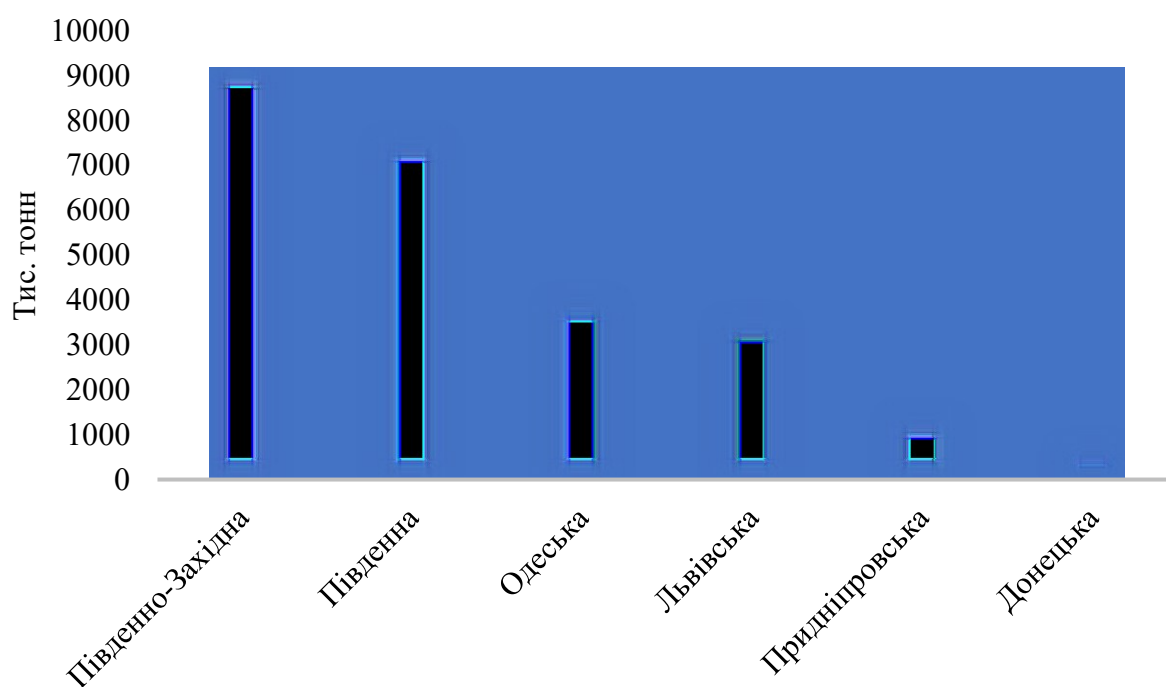


Рисунок 2.5 – Рейтинг регіональних філій АТ «Укрзалізниця» за обсягом експорту зернових та бобових у 2021 році

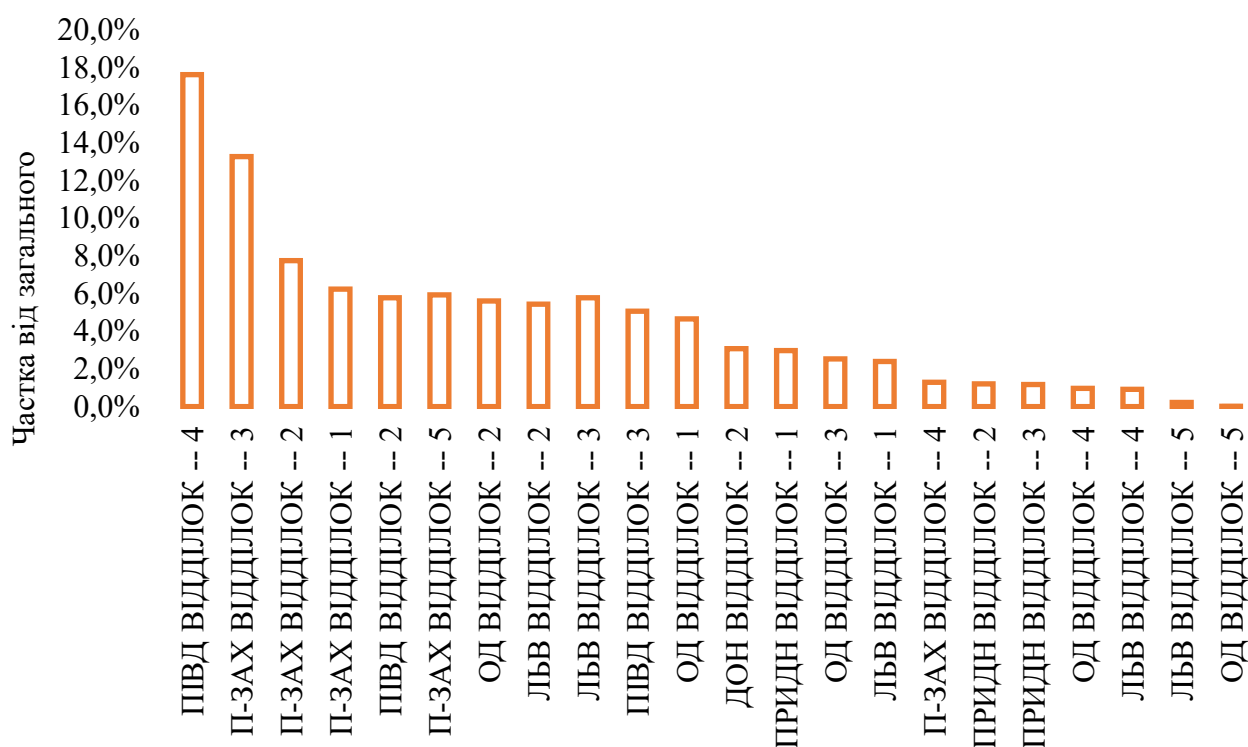


Рисунок 2.6 – Перелік та рейтинг (за обсягом відправлення, тонн) дирекцій залізничних перевезень АТ «Укрзалізниця» по обсягах відправлення експортних вантажів зерна та бобових у 2021 році (в частці від загального)

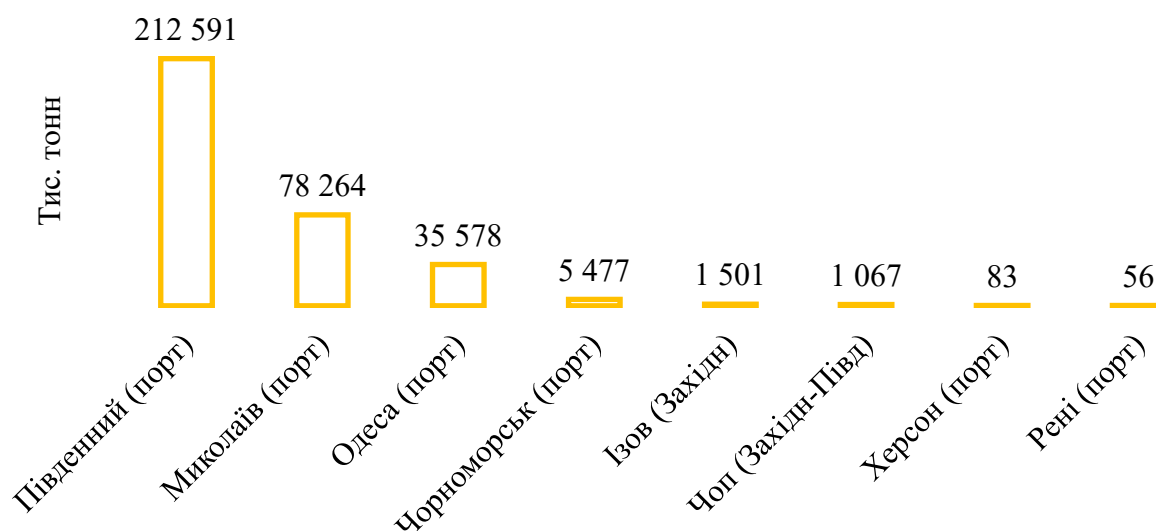


Рисунок 2.7 – Ранжування пунктів пропуску через державний кордон України за показниками річного обсягу автомобільних перевезень зернових вантажів у 2021 році

Рейтинг експортних вантажопотоків зернових та бобових у морських портах України за походженням (2021 р) у тис. тонн наведено на рисунку 2.8, та пунктів

зародження експортних вантажопотоків зернових по регіональних філіях АТ «Укрзалізниця» зазначено на рисунку 2.9.

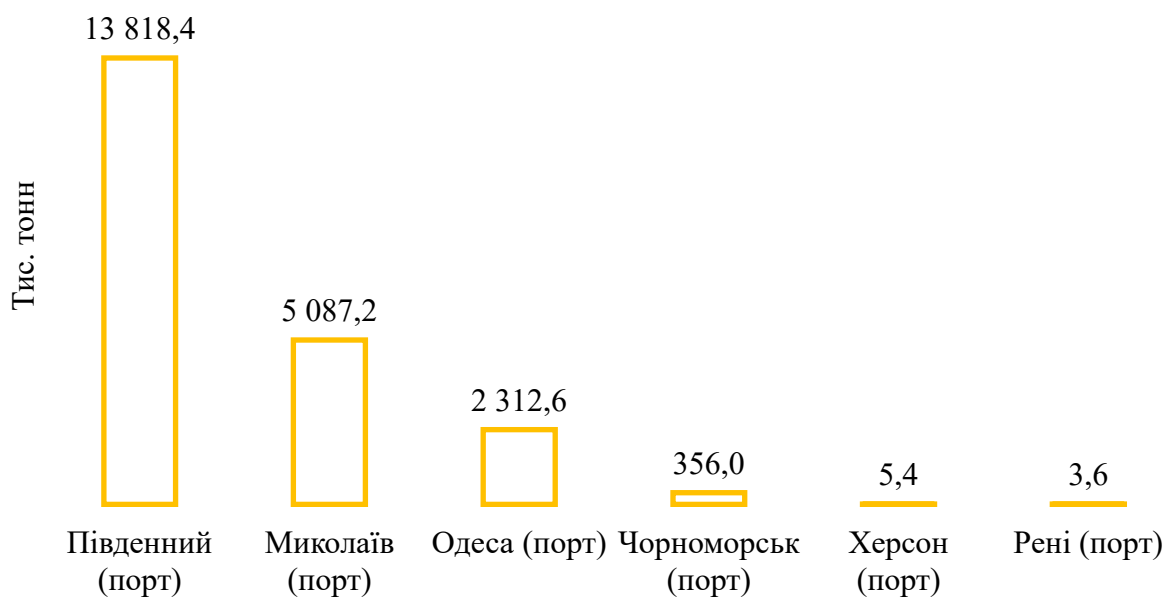


Рисунок 2.8 – Рейтинг експорту зерна та бобових через морські торговельні порти у 2021 році

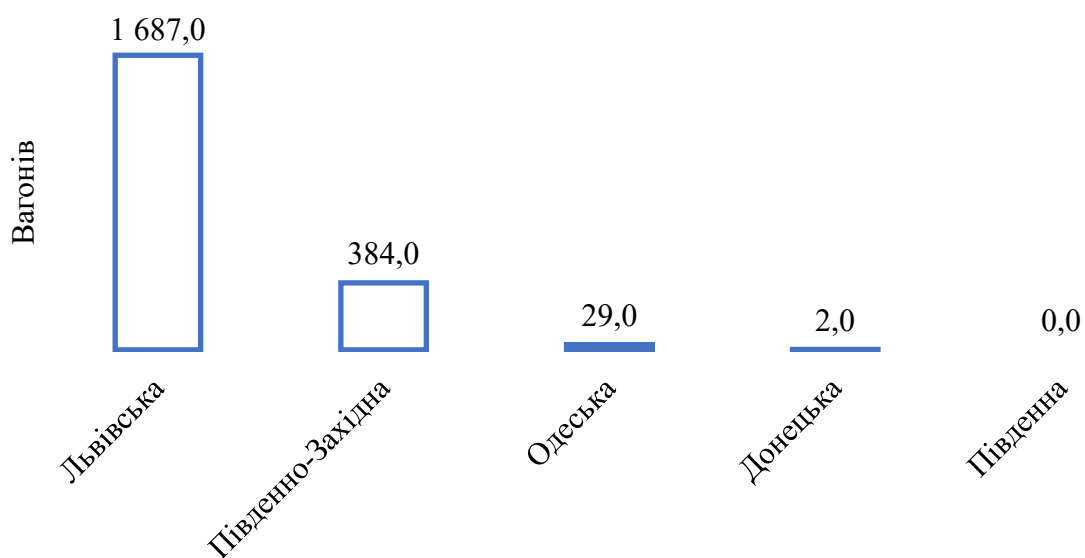


Рисунок 2.9 – Рейтинг експорту зерна та бобових через наземні пункти пропуску, 2021 рік

Враховуючи, що умови маршруту від кожного джерела вантажопотоку до морських торговельних портів є однаковими (усі порти розташовані в південно-

західній частині України), відповідне співвідношення вантажопотоку є таким, як наведено на рисунку 2.10:

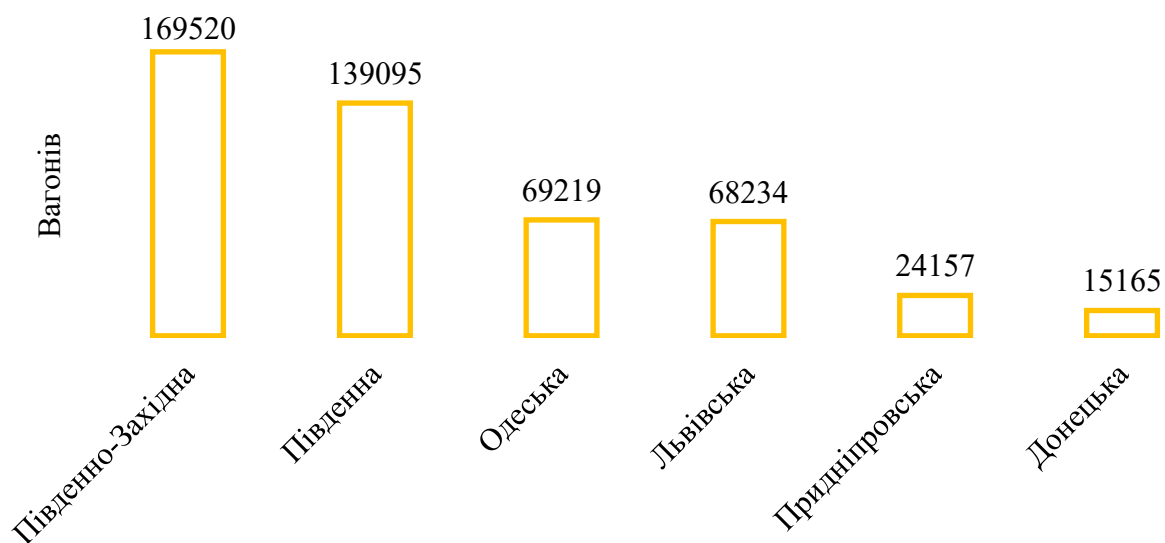


Рисунок 2.10 – Рейтинг регіональних філій АТ «Укрзалізниця» за обсягом експорту зернових та бобових культур у 2021 році

На підставі встановлених обсягів відправлення зернових та бобових вантажів і перевезень у міждержавних пунктах пропуску (морських та сухопутних) станом на початок 2022 року встановлено такі відповідності (таблиці 2.3-2.5).

Таблиця 2.3 – Планова відповідність експортних вантажопотоків зернових та бобових територією України у 2021 році (в тис. тонн на рік)

Центри зародження вантажів та пункти прикордонного переходу	Південний МТП	Миколаїв МТП	Одеса МТП	Чорноморськ МТП	Ізов (Західн)	Чоп (Західн-Півд)	Херсон (порт)	Рені (порт)	Разом
Південно-Західна	60017	38243	18604	0	0	0	0	0	116863
Львівська	41191	5848	0	0	0	0	0	0	47039
Одеська	41191	6527	0	0	0	0	0	0	47718
Південна	43085	27646	16974	5477	1501	1067	83	56	95889
Придніпровська	16653	0	0	0	0	0	0	0	16653
Донецька	10454	0	0	0	0	0	0	0	10454
Разом	212591	78264	35578	5477	1501	1067	83	56	334617

Таблиця 2.4 – Оптимальна відповідність експортних вантажопотоків зерна та бобових територією України у 2021 році (тис. т/рік)

Центри зародження вантажів та пункти прикордонного переходу	Південний МТП	Миколаїв МТП	Одеса МТП	Чорноморськ МТП	Ізов (Західн)	Чоп (Західн-Півд)	Херсон (порт)	Рені (порт)	Разом
Південно-Західна	63452	36168	17219	22	0	0	0	2	116863
Львівська	42387	3150	0	0	1500	0	1	0	47039
Одеська	43946	3772	1	0	0	0	0	0	47718
Південна	42052	28836	18358	5455	1	1062	76	49	95889
Придніпровська	13485	3168	0	0	0	0	0	0	16653
Донецька	7269	3169	0	0	0	5	5	5	10454
Разом	212591	78264	35578	5477	1501	1067	83	56	334617

Таблиця 2.5 – Відповідність вантажопотоків експортних сполучень зерна та бобових по Україні у 2021 р., тис. тонн

Регіональна філія АТ «Укрзалізниця»	Чорноморський МТП	Миколаївський МТП	Одеський МТП	Херсонський МТП	Західний сухопутний перехід	Разом
Південно-Західна	5570	2344	1268	3	384	9569
Південна	4573	1924	1041	3	0	7541
Одеська	2413	1015	549	1	29	4007
Львівська	2138	900	487	1	1687	5213
Придніпровська	838	352	191	0	0	1381
Донецька	425	179	97	0	2	703
Разом	15957	6714	3631	9	2102	28414

Станом на кінець 2021 року загальний обсяг експортованих вантажів становив близько 28,414 млн тонн без урахування разових автомобільних перевезень у міжнародному сполученні [108].

Водночас після початку агресії з боку рф, окупації частини Херсонської області та постійних обстрілів Миколаївського торговельного порту могли бути

використані практично лише порти Великої Одеси: Одеса, Чорноморськ, Південний та інші південно-західні порти, такі як Рені.

Крім того, розглядався варіант збільшення обсягів наземного транспорту в напрямку прикордонних переходів, таких як Ягодин, Мостиська, Чоп та ін. Таким чином, обсяг вантажів у напрямку Миколаєва та Херсона мав бути переправлений на інші пункти пропуску. Тому решта вантажу відправлялася через сухопутний коридор Ягодин (залізнична станція Ізов).

За офіційними даними АТ «Укрзалізниця», відстані між основними центрами відправлення вантажів (у розрізі регіональних філій) та найближчим пунктом транзиту до міждержавного пункту пропуску такі (таблиця 2.6).

Таблиця 2.6 – Матриця відстаней між пунктами посіву зернових та транзитними пунктами експортного маршруту, км. Джерело [109]

Регіональна філія АТ «Укрзалізниця»	Чорноморський МТП	Миколаївський МТП	Одеський МТП	Рені МТП	Західний сухопутний перехід Ягодин
Південно-Західна	709	624	684	678	621
Південна	923	594	892	648	1099
Одеська	116	687	85	361	862
Львівська	780	1053	755	1107	417
Придніпровська	803	404	772	458	1073
Донецька	1077	678	1046	732	1370

Однак, згідно із загальнодоступними даними, у 2022 році перевезення тонни вантажу залізницею коштувало від 6,08 до 11,50 дол. США. У центральній Україні транспортування товарів залізницею до ЄС коштувало 80-120 дол. США за тону [104, 110-111]. Тому матрицю витрат на транспортування експортного зерна було встановлено пропорційним методом (таблиця 2.7).

Таблиця 2.7 – Матриця вартості залізничного транспорту (дол. США) за 1 тонну

Регіональна філія АТ «Укрзалізниця»	Чорноморський МТП	Миколаївський МТП	Одеський МТП	Рені МТП	Західний сухопутний перехід Ягодин
Південно-Західна	9,1	8,8	9,0	11,97	105,4
Південна	9,9	8,7	9,8	11,86	122,1
Одеська	6,9	9,0	6,8	10,81	113,8
Львівська	9,3	10,3	9,3	13,54	98,3
Придніпровська	9,4	8,0	9,3	11,16	121,2
Донецька	10,4	9,0	10,3	12,17	131,5

Під час аналізу вантажопотоків ключовим є встановлення нерівномірності їх формування, щільності розподілу та інших параметрів стохастичного процесу. При аналізі середньомісячних обсягів відправки вагонів із зерновими на експорт за даними 2021/2022 маркетингового року встановлено, що щільність розподілу показника найточніше апроксимується експоненційним розподілом та іншими «несиметричними» розподілами (рисунок 2.11, таблиця 2.8).

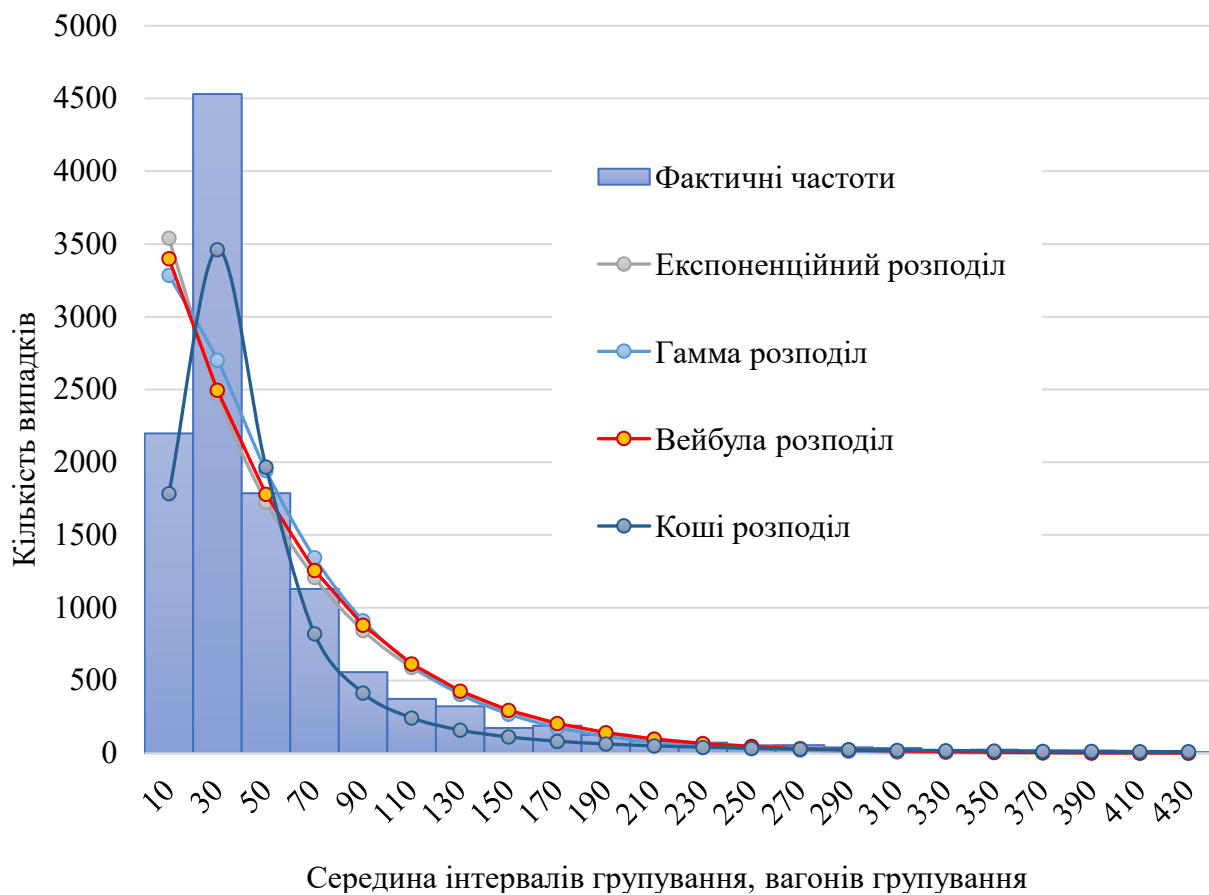


Рисунок 2.11 – Графіки апроксимації теоретичними законами розподілу щільності розподілу середньомісячних обсягів відправки вагонів із зерновими на експорт за даними 2021/2022 маркетингового року

Таблиця 2.8 – Масиви даних апроксимації теоретичними законами розподілу щільності розподілу середньомісячних обсягів відправки вагонів із зерновими на експорт за даними 2021/2022 маркетингового року

Порядок	Сер значення інтервалу	Фактичні частоти	Інтегральна фактичних частот	Інтегральна фактичних частот (відсоток)	Експоненційний розподіл	Ерланга розподіл	Гамма розподіл	Вейбула розподіл	Коші розподіл
1	10.0	2198	2198	19%	3540.1	3540.1	3285.8	3399.2	1784.3
2	30.0	4531	6729	57%	2473.5	2473.5	2702.8	2496.7	3462.0
3	50.0	1787	8516	72%	1728.3	1728.3	1944.0	1781.0	1968.0
4	70.0	1129	9645	82%	1207.6	1207.6	1343.6	1256.3	820.8
5	90.0	557	10202	86%	843.7	843.7	910.8	880.4	413.3
6	110.0	373	10575	90%	589.5	589.5	610.3	614.1	243.2
7	130.0	322	10897	92%	411.9	411.9	405.8	426.9	158.9
8	150.0	173	11070	94%	287.8	287.8	268.4	295.9	111.5
9	170.0	189	11259	95%	201.1	201.1	176.8	204.6	82.4
10	190.0	126	11385	96%	140.5	140.5	116.0	141.2	63.3
11	210.0	82	11467	97%	98.2	98.2	76.0	97.3	50.2
12	230.0	73	11540	98%	68.6	68.6	49.7	66.9	40.7
13	250.0	54	11594	98%	47.9	47.9	32.4	46.0	33.7
14	270.0	55	11649	99%	33.5	33.5	21.1	31.5	28.3
15	290.0	40	11689	99%	23.4	23.4	13.7	21.6	24.1
16	310.0	35	11724	99%	16.3	16.3	8.9	14.8	20.8
17	330.0	16	11740	99%	11.4	11.4	5.8	10.1	18.1
18	350.0	24	11764	100%	8.0	8.0	3.8	6.9	15.9
19	370.0	18	11782	100%	5.6	5.6	2.4	4.7	14.1
20	390.0	17	11799	100%	3.9	3.9	1.6	3.2	12.6
21	410.0	7	11806	100%	2.7	2.7	1.0	2.2	11.3
22	430.0	7	11813	100%	1.9	1.9	0.7	1.5	10.2
$\chi^2=$					<b>2648.7</b>	<b>2648.7</b>	<b>2606.0</b>	<b>2626.2</b>	<b>1191.7</b>
<b>Параметри законів розподілу</b>					-	Порядок Ерланга $k = 0$	Параметр форми <b>1.228</b>	Параметр $a$ <b>1.035</b>	Параметр центру $a$ <b>31.066</b>
					-	-	Параметр масштабу <b>44.823</b>	Параметр $b$ <b>57.457</b>	Параметр масштабу $c$ <b>21.670</b>

Найменше відхилення спостерігається при апроксимаціях розподілу Коші та гамма-розподілу. При цьому математичне сподівання становить:

$$M(x) = 55,8 \text{ ваг.},$$

стандартне відхилення:

$$\sigma(x) = 58,0 \text{ ваг.},$$

коефіцієнт варіації:

$$v(x) = 1,04.$$

Експоненційна природа щільності розподілу показника підтверджується значенням коефіцієнта варіації дуже близьким до 1,0.

Таким чином, наукове завдання зводиться до пошуку найкращої відповідності вантажопотоку до ефективності організації перевізної роботи, де критерієм оптимальності можуть бути мінімальні загальні техніко-експлуатаційні витрати. Для вирішення поставлених завдань необхідно:

- створити оптимізаційну модель на основі мінімальної сумарної вартості логістики постачання зерна від відправлення до прикордонного порту (порту, сухопутного порту);
- встановити оптимальне значення повної логістичної вартості.

## 2.2 Аналіз ефективності існуючих транспортно-технологічних ліній транспортування зернових

Через широкомасштабну агресію українській транспортній системі складно забезпечити стабільний експорт сільськогосподарської продукції, особливо зернових, бобових та продуктів їх переробки. Важливим залишається пошук безпечних та ефективних шляхів постачання продукції аграрного сектору України в глобальний ланцюг поставок.

Попередній аналіз якісних показників роботи транспортної системи України показує, що збільшення виробництва зерна та бобових призвело до дефіциту пропускної здатності наземної припортової транспортної інфраструктури, особливо морських торговельних портів Великої Одеси, Миколаєва та Херсона.

З одного боку, є об'єктивні причини обмежених можливостей – через військову агресію російської федерації порушено судноплавство в Азовському та Чорному морях. Крім того, гостро не вистачає складських приміщень для вантажів – перевантажувальних пунктів, елеваторів і складів. На нашу думку, ці два фактори в сукупності призводять до зниження пропускної спроможності української транспортної системи з доставки зерна та бобових на зовнішні ринки.

Важливим завданням наукового планування є визначення оптимальних параметрів транспортної системи для підвищення пропускної спроможності технічних ліній руху.

Для забезпечення сталого експорту зернових та зернобобових культур в умовах сучасної ситуації в Україні широко застосовуються такі способи транспортування:

- зерно транспортується автомобільним транспортом від основного пункту збору до порту й далі морським транспортом;
- зерно транспортується автомобільним транспортом до пункту консолідації й проміжного зберігання, потім – залізничним транспортом до порту;
- контейнерні перевезення.

Доставка товару наземним транспортом до внутрішнього порту, далі – морським транспортом (рисунок 2.12).

З технічної точки зору, поєднання морського, залізничного та автомобільного транспорту є найбільш ефективним видом транспортування.

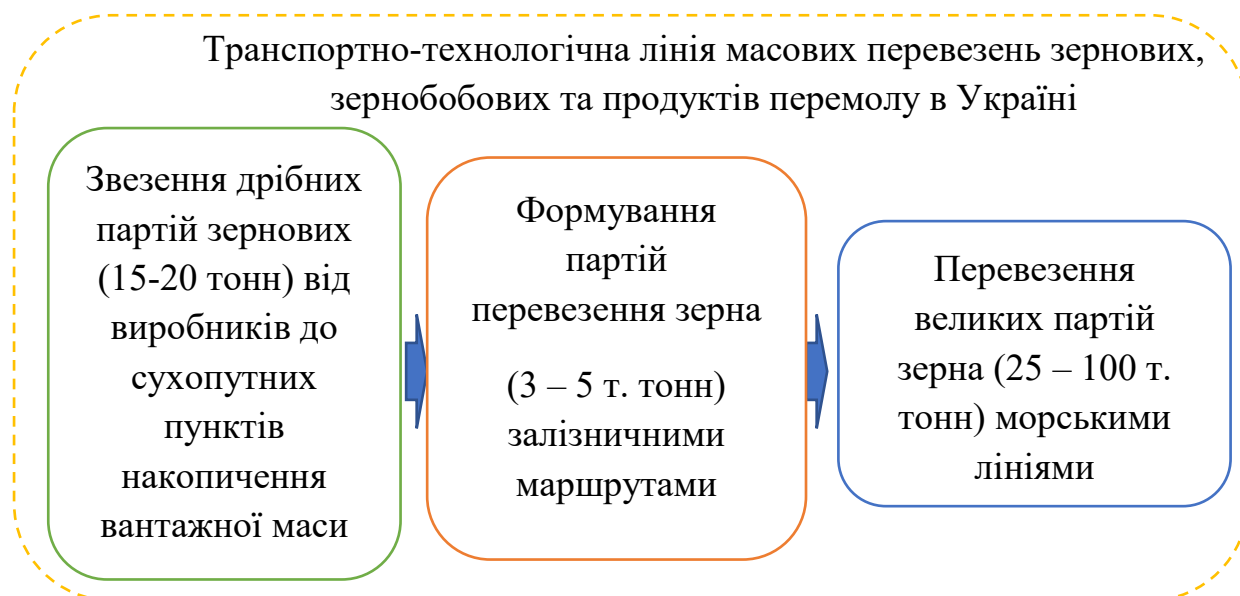
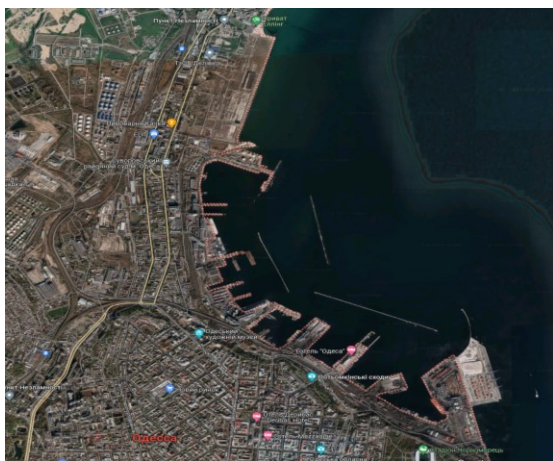


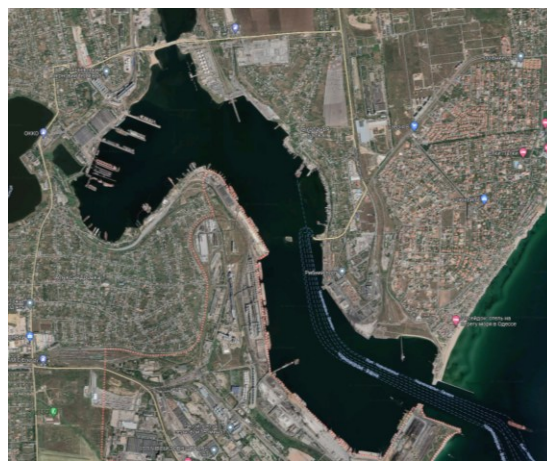
Рисунок 2.12 – Типова модель мультимодального маршруту постачання зернових на експорт з України

По-перше, через монопольне становище та природні процеси лібералізації вантажних перевезень залізничний транспорт функціонує нестабільно. По-друге, в Україні відсутні достатні потужності для тимчасового зберігання зернових. По-третє, є технічні складнощі розбудови нових терміналів у портах через брак вільної території. Згідно з відкритими даними супутникових спостережень, більшість портів України розташовані в густонаселених містах, що практично унеможлиблює технічний розвиток і планування портового обладнання (рисунок 2.13).

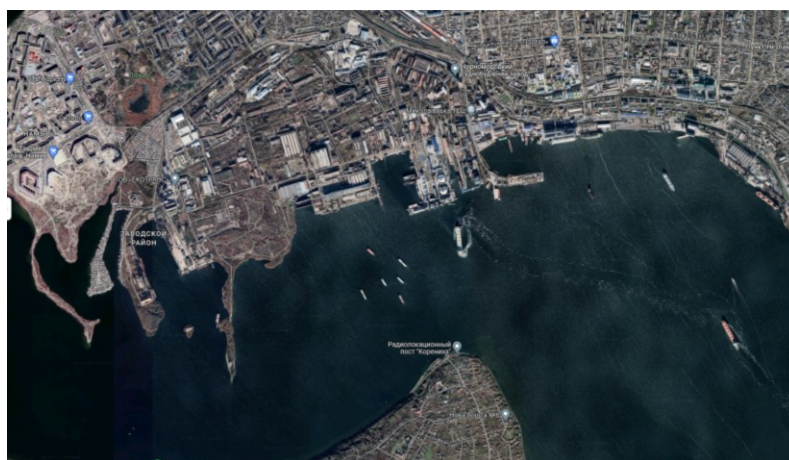
Навіть після прийняття Закону України «Про морські порти» [112], який, зокрема, допускає концесію, тобто оренду на термін до 49 років із правом часткової приватизації об'єктів портової інфраструктури, залишається питання відчуження необхідної для підведення наземних ліній припортової території, яка знаходиться у приватній або державній власності.



a)\*



b)\*



c)\*

Рисунок 2.13 – Супутникові знімки, що підтверджують складність розвитку портового устаткування через щільну міську забудову: а) Одеса; б) Чорноморськ; с) Миколаїв. Джерело [113]

Українські порти, як і багато морських торгових портів світу, розташовані в межах великих населених пунктів. Наразі розвиток портової інфраструктури може здійснюватися лише за рахунок штучно створених ділянок землі, тобто на морі. Ця проблема є серйозною та складною не лише з технічної та технологічної точок зору. Зокрема, це питання належить до найскладніших і з правової точки зору, оскільки портова інфраструктура зазвичай знаходиться в межах двох видів (з правової точки зору) земель: водних ресурсів та водного транспорту.

Тому сьогодні більшість перевезень зернових, бобових та продуктів перемолю й олійних транспортується за допомогою першого варіанту, головним чином через

простоту організації та прийнятний ступінь лібералізації ринку автотранспортних послуг. Водночас такий підхід є далеко не найефективнішим із точки зору надійності транспортного сполучення (через недостатню пропускну спроможність автомобільних доріг), вартості перевезень та негативного впливу на навколишнє середовище (рисунок 2.14).

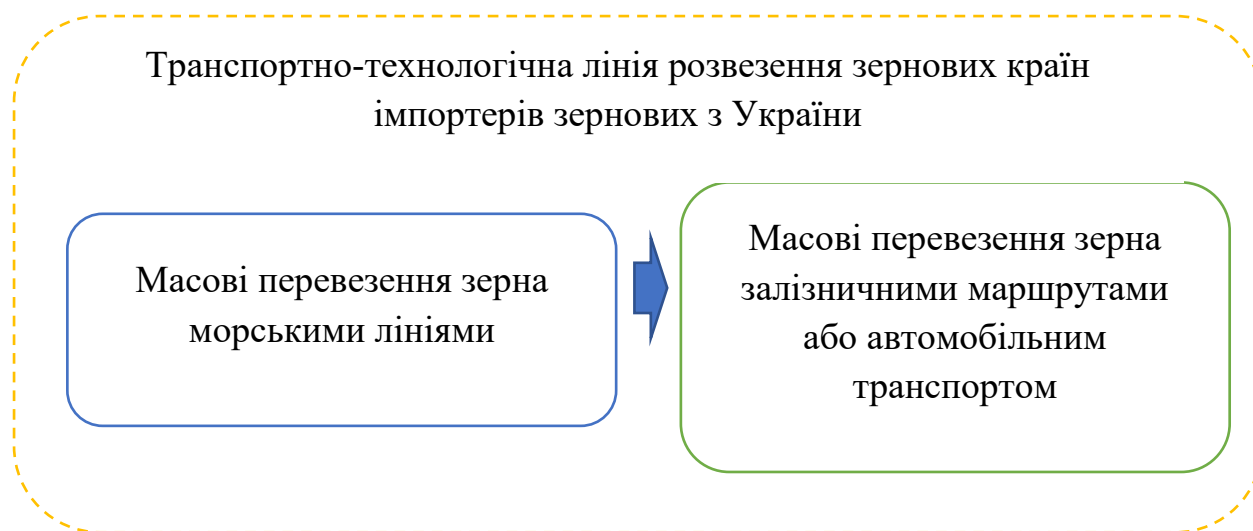


Рисунок 2.14 – Варіанти типової моделі транспортно-технологічних маршрутів українського експорту зерна

З розвитком нових глобальних ланцюжків поставок дедалі важливішим стає питання модернізації існуючої інфраструктури. Особливо це стосується оптимізації систем обробки інформаційних потоків при взаємодії наземного і водного видів транспорту. Гостро ця проблема стоїть у портових господарствах, що знаходяться у приватній власності, де відсутність своєчасної та достовірної інформації про стан транспортних операцій є стримуючим фактором у підвищенні якості виконання транспортних операцій.

Крім того, інвестиції у портове устаткування через низку причин мають значний термін окупності. Тому зазначені проблеми мають вагомий негативний вплив на розвиток портової інфраструктури.

Аналіз показників виконаної роботи залізничного транспорту вказує на те, що значна частка перевізної роботи у 2018-2021 роках припадала на перевезення зернових, зернобобових та продуктів перемолу. Хоча нерівномірність зародження

зазначених вантажопотоків є достатньо сильною (Додаток А, рисунок А.1, рисунок 2.15).

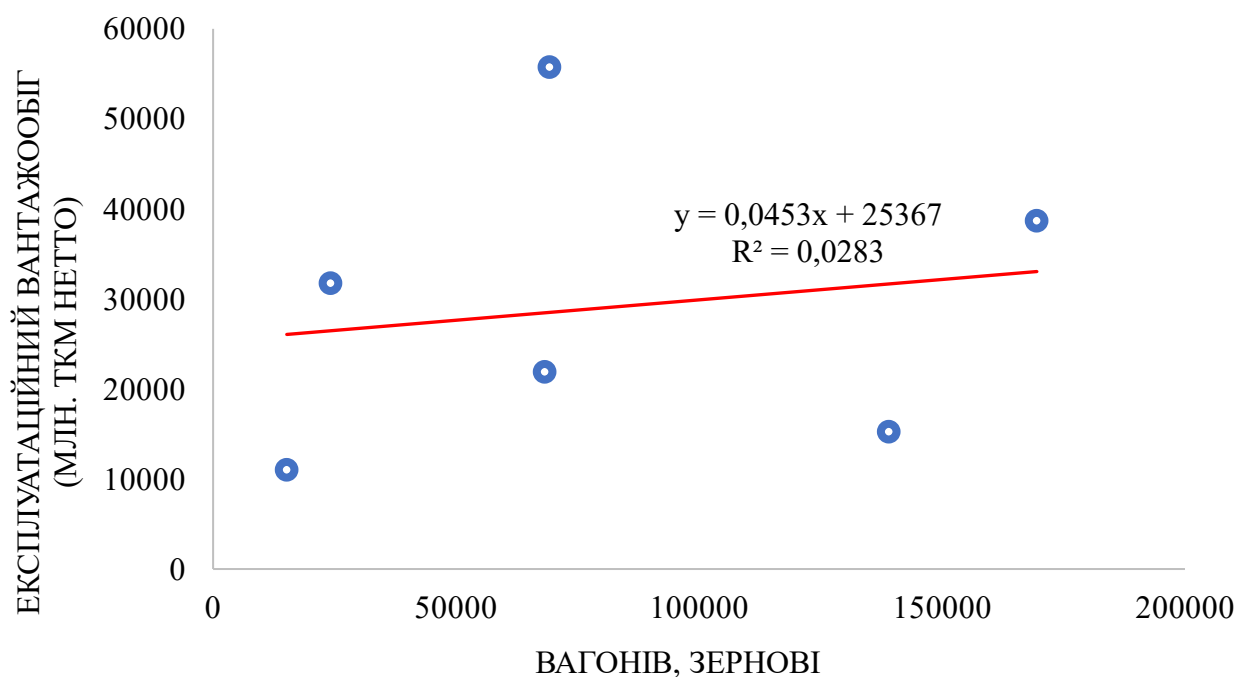


Рисунок 2.15 – Взаємозалежність між обсягом відправки зернових (у вагонах) та експлуатаційним вантажообігом (млн. т-км нетто) по регіональних філіях АТ «Укрзалізниця» за 2021 р

Так, взаємозв'язок між обсягом відправлених зернових та експлуатаційним вантажообігом по регіональних філіях АТ «Укрзалізниця» має наближений лінійний характер. Тобто зі збільшенням показника сукупного обсягу відправки зернових (вагонів) спостерігається збільшення показника «Експлуатаційний вантажообіг» (млн. т-км нетто), що свідчить про певну пропорційність обсягу перевезення зернових у структурі експлуатаційної роботи.

На значну та сталу пропорційність обсягу перевезення зернових, у загальних обсягах перевезення вантажів, також вказує ще більший зв'язок між обсягом відправки зернових (у вагонах) та обсягом відправлених вантажів (тис. т) по філіях АТ «Укрзалізниця» за 2021 р. (рисунки 2.16, 2.17). Тобто при збільшенні обсягів відправки зернових (у вагонах) спостерігається збільшений обсяг відправлення всіх

вантажів. Зв'язок, з одного боку, дещо нелогічний, з іншого боку, демонструє стабільно високу частку обсягу зернових у загальній структурі вантажопотоку.

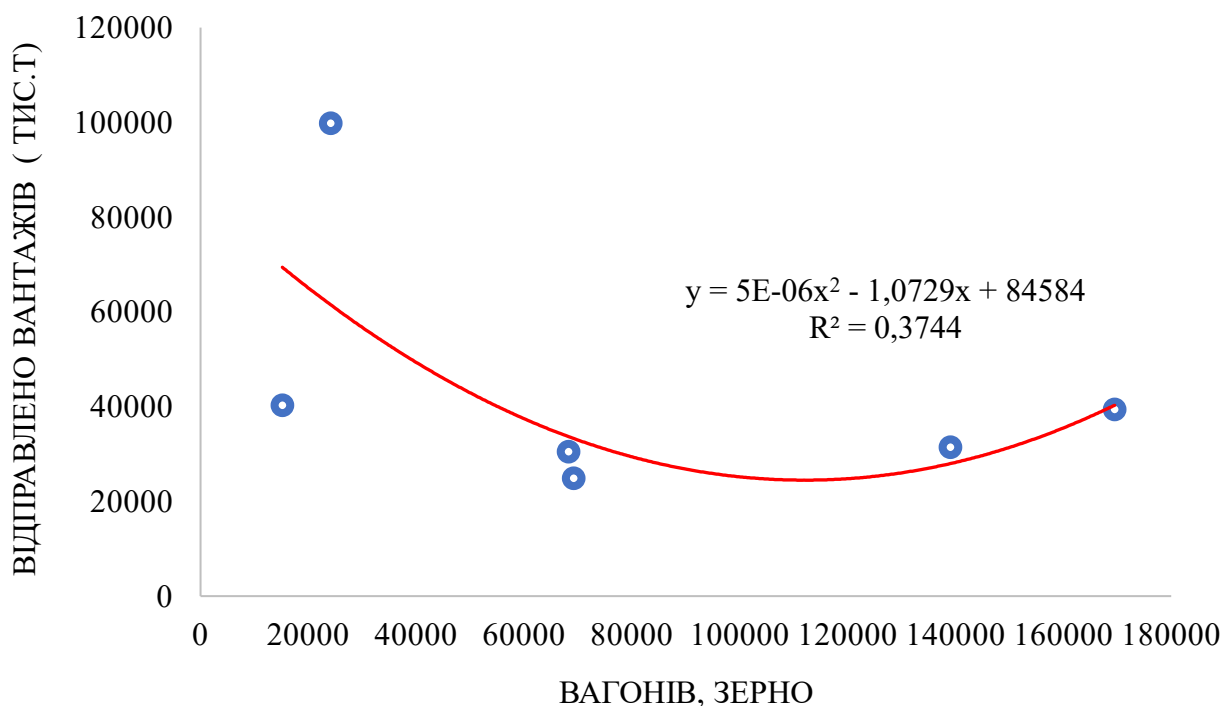


Рисунок 2.16 – Взаємозалежність між обсягом відправки зернових (у вагонах) та обсягом відправлених вантажів (тис. т) по регіональних філіях АТ «Укрзалізниця» за 2021 р

Сама частка вагонопотоку із зерновими в загальній структурі вагонопотоку має параболічну природу із чітко вираженими трьома групами показників:

- велика частка зернових при невеликих обсягах відправки зернових – Донецька та Придніпровська регіональні філії;
- низька частка зернових при відносно середніх обсягах відправки зернових – Львівська й Одеська регіональні філії;
- велика частка зернових при відносно великих обсягах вантажопотоків – Південно-Західна та Південна регіональні філії.

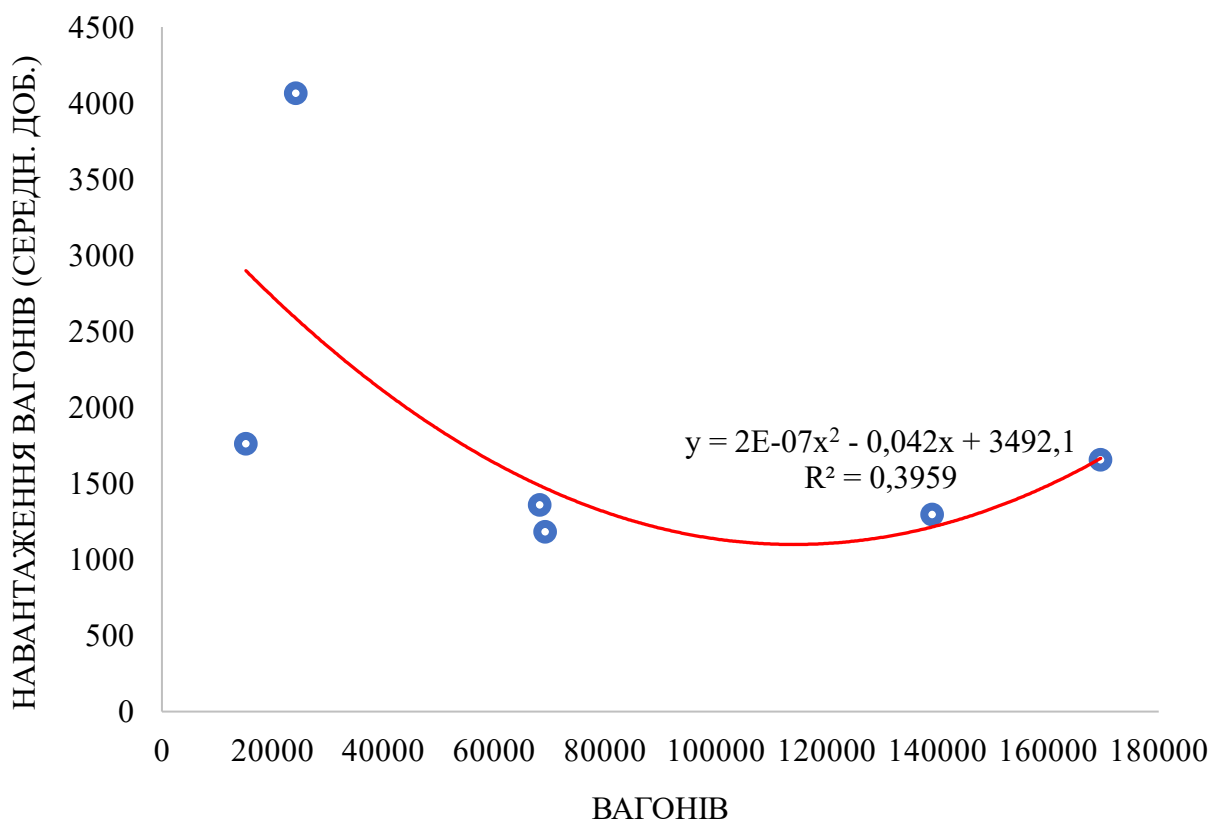


Рисунок 2.17 – Взаємозалежність між обсягом відправки зернових (у вагонах) та середньодобовою кількістю навантажених вагонів по регіональних філіях АТ «Укрзалізниця» за 2021 р

Тобто найнижча частка зернових у загальній структурі вагонопотоку припадає на три регіональні філії: Одеську, Львівську та Придніпровську. Така ситуація пояснюється межуванням цих філій із міждержавними прикордонними переходами (морськими торговельними портами – Одеська та Придніпровська регіональні філії, сухопутними переходами – Львівська регіональна філія). Для Донецької філії ситуація пояснюється значним негативним впливом бойових дій та військової агресії з боку російської федерації (рисунок 2.18).

Отже, найбільш актуальною в сенсі формування перевізної роботи зернових є ситуація для Південно-Західної та Південної регіональних філій, оскільки саме тут спостерігається зародження значних вантажопотоків зернових, і території саме цих філій знаходяться найдалі від прикордонних пунктів перетину.

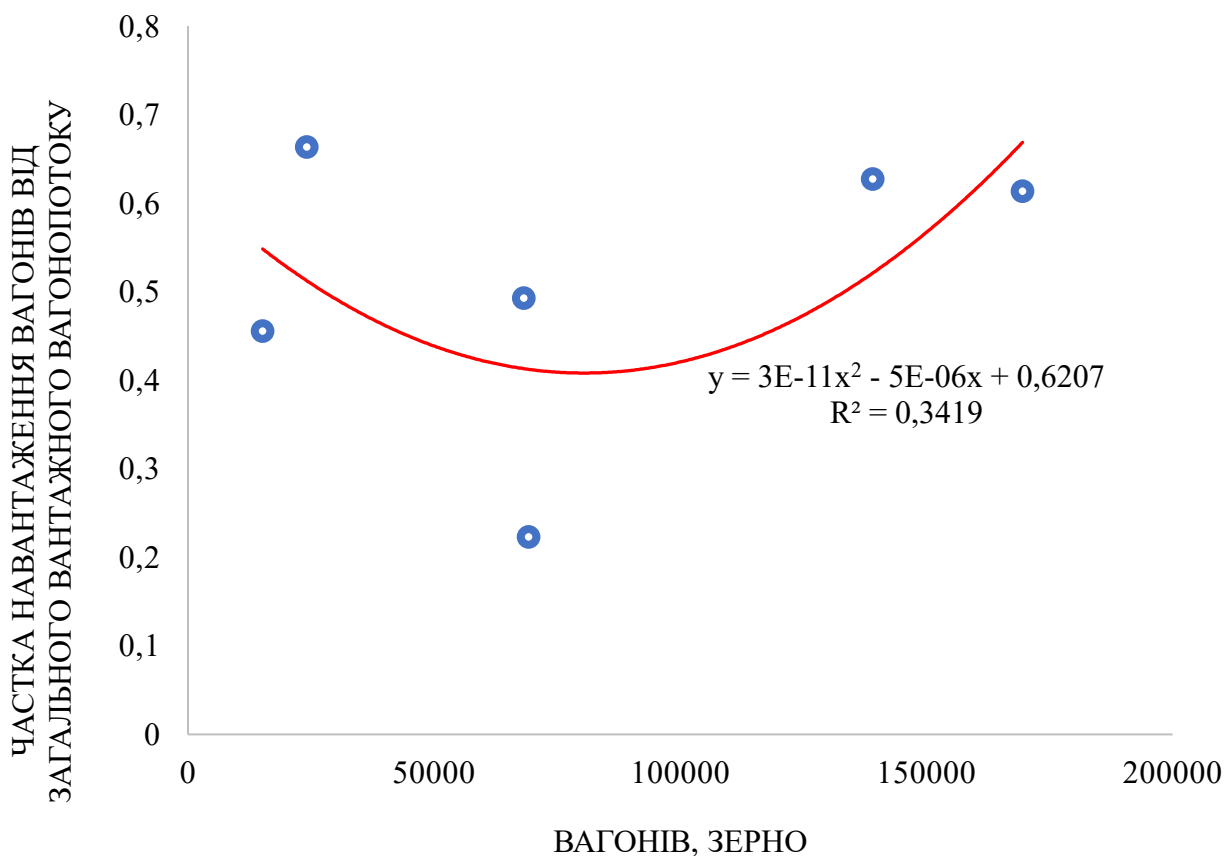


Рисунок 2.18 – Взаємозалежність між обсягом відправки зернових (у вагонах) та часткою навантаження вагонів від загального вантажного вагонопотоку по регіональних філіях АТ «Укрзалізниця» за 2021 р

При аналізі зв'язку між обсягом відправки зернових (у вагонах) та середньодобовою продуктивністю вагона (т-км нетто) по регіональних філіях АТ «Укрзалізниця» за 2021 р. можна стверджувати, що найвищий зазначений показник спостерігається для Одеської та Південно-Західної регіональних філій. Загалом зазначена залежність має зростаючу, слабку логарифмічну функціональну залежність (рисунок 2.19).

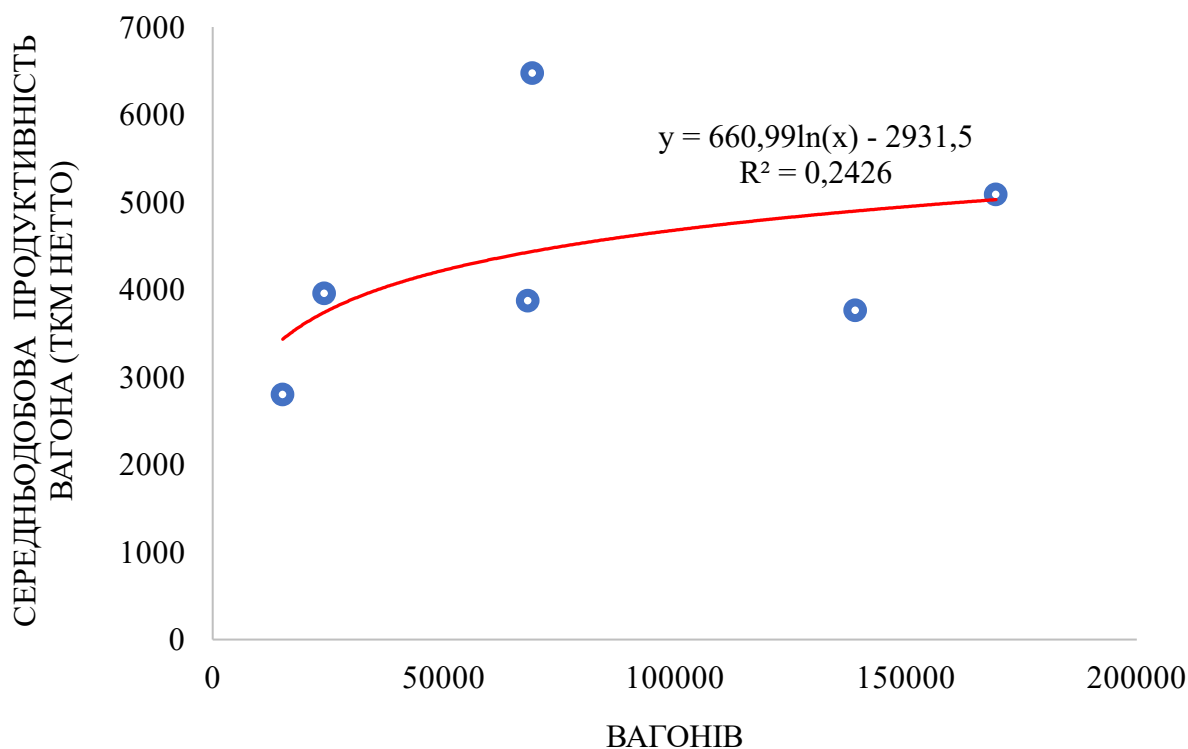


Рисунок 2.19 – Взаємозалежність між обсягом відправки зернових (у вагонах) та середньодовою продуктивністю вагона (т-км нетто) по регіональних філіях АТ «Укрзалізниця» за 2021 р

Із залежностей, наведених на рисунках 2.15 та 2.19, видно, що зв'язок є майже відсутнім або взагалі відсутній, на що вказують коефіцієнти детермінації, які варіюються від 0 до 0,4. Це свідчить про те, що структура перевезень зернових є достатньо складною та передбачає різні умови транспортування для різних видів зернових, зернобобових і олійних культур.

Разом із тим, із наведеного вище аналізу можна зробити висновок, що всі залежності мають прямо пропорційний характер, і прогнозоване зростання загальних обсягів перевезень зернових, зернобобових та олійних культур потребує планового збільшення обсягів перевізної роботи, робочого парку вагонів, а також відповідного підсилення локомотивного парку та виділеної пропускнуї спроможності.

## 2.3 Висновки до розділу 2

За даними офіційної статистики, в Україні протягом останніх 10 років спостерігається стійке зростання обсягів виробництва зернових, зернобобових, продуктів перемолу та олійних, орієнтованих на експорт. Станом на маркетинговий рік 2021/2022 цей показник досяг приблизно 61 млн. тонн. Відповідно до прогнозів Міністерства економіки України, до 2027 року обсяги експорту зростуть ще на 14 млн. тонн, а до 2030 року можуть досягти 80 млн. тонн.

Найбільш раціональним способом доставки таких обсягів у межах глобальних ланцюгів постачання є мультимодальний транспортно-технологічний маршрут, що включає:

- автомобільний транспорт: дистрибуція, первинне збирання вантажів з місць їх зародження, перевезення до пунктів стикування із залізничним транспортом;
- залізничний транспорт: організація зернових маршрутів від місць навантаження до терміналів морських торговельних портів або пунктів стикування із водним транспортом;
- водний (морський) транспорт: перевезення великих партій вантажів до торговельних морських портів країн-імпортерів української аграрної продукції.

Такий мультимодальний підхід є одним із найефективніших, оскільки забезпечує:

- найнижчу собівартість транспортування;
- високу надійність доставки;
- значну провізну спроможність у глобальних ланцюгах постачання.

За даними АТ «Українські залізниці», розподіл вантажної маси зернових та зернобобових, призначених для експорту, в межах території України є нерівномірним. Найбільші обсяги зароджуються в межах Південно-Західної регіональної філії (9,87 млн. тонн) та Південної філії (7,54 млн. тонн). Структура вагонопотоку зернових має параболічну природу, яку можна умовно поділити на три групи. Велика частка зернових при невеликих загальних обсягах вантажних перевезень – Донецька та Придніпровська регіональні філії. Низька частка зернових

при середніх обсягах вантажних перевезень – Львівська та Одеська регіональні філії. Велика частка зернових при значних загальних обсягах вантажних перевезень – Південно-Західна та Південна регіональні філії.

Найбільш актуальною у контексті формування перевізної роботи є ситуація для Південно-Західної та Південної регіональних філій. У цих регіонах спостерігається зародження найбільших вантажопотоків зернових, а їхні території розташовані на найбільшій відстані від прикордонних пунктів перетину.

Таким чином, постає науково-прикладне завдання оптимізації параметрів транспортно-технологічних ліній для забезпечення постачання значних обсягів зернових, зернобобових, продуктів перемолю та олійних від місць зародження до прикордонних митних переходів (як сухопутних, так і морських). Це завдання особливо актуальне для регіонів Південно-Західної та Південної регіональних філій.

Для розв'язання поставленої проблеми у подальших розділах необхідно:

1. Розробити оптимізаційну модель, яка мінімізуватиме сумарну вартість логістики постачання зернових від пункту відправлення до прикордонного пункту: морського порту або сухопутного переходу.

2. Встановити оптимальні параметри транспортно-технологічних ліній для зазначених умов.

## РОЗДІЛ 3

### МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ТРАНСПОРТНО-ТЕХНОЛОГІЧНОЇ ЛІНІЇ ДОСТАВКИ ЗЕРНОВИХ У ЗМІШАНОМУ СПОЛУЧЕННІ

#### 3.1 Обґрунтування критеріїв оптимізації математичної моделі

Відповідно до офіційних статистичних даних, навіть у період широкомасштабної військової агресії з боку російської федерації, блокування транспортних коридорів, українська аграрна промисловість залишається важливим гравцем на світовому ринку. Особливу проблему складають постійні блокування морських торговельних портів та морських суднохідних маршрутів в акваторії Чорного моря.

За оптимістичними прогнозами низки світових інституцій (ООН, Міністерства аграрної політики США, Світового банку та ін.), обсяг експорту з України зернових, зернобобових, олійних та продуктів їх первинної переробки у 2028-2030 роках становитиме орієнтовно 50-70 млн. тонн на рік. Цей прогноз слід виділяти у двох аспектах:

- можливість виробництва;
- можливість доставки у глобальних ланцюгах постачання, оскільки мова йде саме про експорт у глобальних ланцюгах постачання.

Тому наукове завдання зводиться до обґрунтування оптимальних параметрів транспортно-технологічної системи доставки зернових з України у глобальних маршрутах постачання.

Для вирішення поставленого наукового завдання необхідно:

1. Обґрунтувати критерій оптимізації транспортно-технологічної лінії.
2. Формалізувати процес доставки зернових у глобальних ланцюгах постачання через розробку математичної моделі за обраним критерієм оптимізації.
3. Через реалізацію оптимізаційної математичної моделі знайти оптимальні рішення.

4. Розробити методично-інструктивні рекомендації щодо використання результатів оптимізації на практиці.

Виконаємо обґрунтування критерію оптимізації. Класично, критерієм оптимізації, відповідно до логістичних принципів, у тому числі при організації перевезення масових сипучих вантажів за участі залізничного транспорту може вважатись мінімізація часу доставки. Однак разом із тим критерієм оптимізації може виступати собівартість перевезення, мінімізація приведених (сукупних) вагоно-годин, вагоно-кілометрів, імовірності технологічної відмови часу доставки вантажів та ін. [114].

Разом з тим, саме час доставки вантажів враховує можливі затримки, порушення у роботі та раціональне використання рухомого складу і транспортної інфраструктури. Крім того час доставки вантажів найбільше залежить від раціональності технологічних процесів залізничних та інших транспортних систем [115]. Тому саме цей критерій буде використано для оптимізації математичної моделі.

### 3.2 Математична модель процесу доставки зернових у змішаному автомобільно-залізнично-водному сполученні

Сукупний час доставки вантажів може розглядатись як системний показник функціонування транспортно-технологічної лінії, оскільки враховує перебування вантажів на всіх етапах транспортування – від очікування рухомого складу та вільної інфраструктури до часу накопичення до норми маси при завантаженні у транспортні одиниці. Розглянемо доставку зернових найбільш продуктивним та раціональним способом – мультимодальним за участю автомобільного, залізничного та водного (морського) транспорту.

Тоді час доставки вантажу від первинного пункту накопичення до морського торговельного порту призначення становитиме:

$$\overline{t_{\text{дост.норм}}} = \overline{t_{\text{дост.автом}}} + \overline{t_{\text{дост.зал.}}} + \overline{t_{\text{дост.мор.}}} \quad (3.1)$$

де  $\overline{t_{\text{дост.норм}}}$  – середній, нормативний, час доставки вантажу, годин;

$\overline{t_{\text{дост.автом}}}$  – середній, нормативний, час доставки вантажу автомобільним транспортом, годин;

$\overline{t_{\text{дост.зал.}}}$  – середній, нормативний, час доставки вантажу залізничним транспортом, годин;

$\overline{t_{\text{дост.мор.}}}$  – середній, нормативний, час доставки вантажу морським транспортом, годин.

Організація доставки автомобільним транспортом являє собою зведення зернових від первинних пунктів накопичення та зберігання зерна до залізничної станції, що обслуговує під'їзну колію завантаження зернового маршруту. Цей процес є складним з точки зору варіативності маршрутів, оскільки має множину пунктів відправлення і, відповідно, множини маршрутів доставки зерна. Середнє значення часу доставки зернових автомобільним транспортом переважно залежить від характеристик усієї множини маршрутів доставки регіону тяжіння до пункту завантаження зернового маршруту, потрібного парку автомобілів та їх вантажомісткості, часу завантаження та вивантаження автомобіля. Тоді середнє значення часу доставки зерна автомобільним транспортом можна представити у неявному виразі, як функції часу накопичення вантажної маси до норми завантаження ( $f_{\text{накоп.автом.}}$ ) і часу транспортування ( $f_{\text{трансп.автом.}}$ ):

$$\overline{t_{\text{дост.автом.}}} = f_{\text{накоп.автом.}}(\lambda_{\text{вант}}; N_{\text{в.а}}) + f_{\text{трансп.автом.}}(\{M_{a.i}; M_{a.l}\}; N_a; N_{\text{в.а}}; t_{\text{зав.а}}; t_{\text{вив.а}}), \quad (3.2)$$

де  $\lambda_{\text{вант}}$  – інтенсивність надходження вантажу до пункту накопичення перед завантаженням у вантажний автомобіль, тонн/добу;

$N_{\text{в.а}}$  – середня технічна норма завантаження вантажного автомобіля, тонн;

$\{M_{a,i}; M_{a,l}\}$  – множина параметрів, що характеризуються маршруту доставки зернових автомобільним транспортом у регіоні формування залізничного зернового маршруту;

$N_a$  – необхідний парк вантажних машин, одиниць;

$t_{зав.а}$  – нормативний час завантаження автомобіля зерном, годин;

$t_{вив.а}$  – нормативний час вивантаження автомобіля, годин.

Організація доставки залізничним транспортом являє собою організацію зернових відправницьких маршрутів як таких, що технологічно можуть забезпечити найменший час доставки залізницею. Цей процес ускладнюється особливостями залізничного транспорту щодо потреби у виділеній пропускній спроможності, потребі у рухомому складі, вагонах та локомотивах. Середнє значення часу доставки зернових залізничними маршрутами переважно залежить від інтенсивності надходження вантажів під завантаження вагонів, тривалістю технологічних операцій на станціях формування маршрутів, часу знаходження складу поїзду на транзитних технічних станціях при зміні локомотивів, часу на вантажні операції у пунктах завантаження та вивантаження. Середнє значення доставки зерна залізничним транспортом можна представити як добуток функцій часу накопичення вантажу до норми завантаження у залізничний маршрут ( $f_{накоп.зал}$ ) та часу транспортування зерновим маршрутом ( $f_{транс.зал}$ ):

$$\overline{t_{дост.зал.}} = f_{накоп.зал.}(\lambda_{вант.зал.}; N_{зал.марш.}) + f_{транс.зал.} \left( \begin{matrix} \{M_{зал.i}; M_{зал.l}\}; N_{вид.п.с.зал.}; N_{ваг.}; N_{локом.}; \\ N_{в.ваг.}; t_{зав.зал.}; t_{вив.зал.}; t_{д.час.зал.} \end{matrix} \right), \quad (3.3)$$

де  $\lambda_{вант.зал.}$  – інтенсивність надходження вантажу до пункту накопичення автомобільним транспортом перед завантаженням у залізничний маршрут, тонн/добу;

$N_{зал.марш.}$  – технологічна норма завантаження залізничного маршруту, тонн

$\{M_{зал.i}; M_{зал.l}\}$  – множина параметрів, що характеризують маршрути доставки зернових залізничним транспортом у морський торговельний порт;

$N_{\text{вид.п.с.зал}}$  – потрібна виділена пропускна спроможність для організації кільцевих залізничних маршрутів, пар поїздів;

$N_{\text{ваг}}$  – необхідний парк вантажних вагонів-зерновозів, одиниць;

$N_{\text{локом}}$  – необхідний парк локомотивів для організації зернових маршрутів, одиниць;

$N_{\text{в.а}}$  – середня технічна норма завантаження вагона-зерновоза, тонн;

$t_{\text{зав.а}}$  – нормативний час завантаження залізничного маршруту зерном, годин;

$t_{\text{вив.а}}$  – нормативний час вивантаження залізничного маршруту, годин.

$t_{\text{д.час.зал}}$  – додатковий час на організацію маршруту на станціях формування та пункті призначення, год.

Для підсистеми морського транспорту ключовим є процес формування вантажної маси для завантаження у судно та процес обслуговування суден у морських торговельних портах. Тому ключовими є час накопичення вантажної маси до норми завантаження у балкер та час обслуговування судно до відправлення у рейс. Сам процес прямування судна до порту призначення є достатньо лінійним і мало у чому залежить від технологічних моментів. Отже середній час перебування вантажної маси у морському торговельному порту є добутком двох функцій – часу накопичення вантажу до норми завантаження у морське судно ( $f_{\text{накоп.мор.()}}$ ) та часу обслуговування судна у порту при завантаженні зерном і відправкою у рейс ( $f_{\text{транс.мор.()}}$ )

$$\overline{t_{\text{дост.мор.}}} = f_{\text{накоп.мор.}}(\lambda_{\text{вант.порт.}}; N_{\text{судно}}) + f_{\text{транс.мор.}}\left(\left\{M_{\text{порт.}i}; M_{\text{порт.}I}\right\}; N_{\text{мор.порт.}}; N_{\text{судно.}}; t_{\text{зав.мор.}}; t_{\text{д.час.мор.}}\right), \quad (3.4)$$

де  $\lambda_{\text{вант.порт.}}$  – інтенсивність надходження вантажу до пункту накопичення залізничним транспортом перед завантаженням у морське судно, тонн/добу;

$N_{\text{судно}}$  – технологічна норма завантаження морського судна, тонн;

$\{M_{\text{порт.}i}; M_{\text{порт.}I}\}$  – множина параметрів, що характеризують маршрути доставки зернових залізничним транспортом у морські торговельні порти призначення вантажу;

$N_{\text{мор.порт}}$  – потрібна виділена переробна спроможність у морському торговельному порті для обслуговування судна;

$t_{\text{зав.мор.}}$  – нормативний час завантаження судна зерном, годин;

$t_{\text{д.час.мор.}}$  – додатковий час на обслуговування судна у порту, год.

Загальний час доставки зерна від пунктів виробництва до порту призначення буде мати такий вигляд:

$$\begin{aligned}
 t_{\text{дост.норм}} = & f_{\text{накоп.автом.}}(\lambda_{\text{вант}}; N_{\text{в.а}}) + \\
 & f_{\text{трансп.автом.}}(\{M_{a.i}; M_{a.I}\}; N_a; N_{\text{в.а}}; t_{\text{зав.а}}; t_{\text{вив.а}}) + \\
 & f_{\text{накоп.зал.}}(\lambda_{\text{вант.зал.}}; N_{\text{зал.марш.}}) + \\
 & f_{\text{трансп.зал.}}\left(\begin{array}{l} \{M_{\text{зал.}i}; M_{\text{зал.}I}\}; N_{\text{вид.п.с.зал.}}; N_{\text{ваг.}}; N_{\text{локом.}}; \\ N_{\text{в.ваг.}}; t_{\text{зав.зал.}}; t_{\text{вив.зал.}}; t_{\text{д.час.зал.}} \end{array}\right) + \\
 & f_{\text{накоп.мор.}}(\lambda_{\text{вант.порт.}}; N_{\text{судно}}) + \\
 & f_{\text{трансп.мор.}}\left(\begin{array}{l} \{M_{\text{порт.}i}; M_{\text{порт.}I}\}; N_{\text{мор.порт.}}; N_{\text{судно.}}; \\ t_{\text{зав.мор.}}; t_{\text{д.час.мор.}} \end{array}\right)
 \end{aligned} \tag{3.5}$$

а оптимізаційна задача зводиться до мінімізації цього часу:

$$t_{\text{дост.норм}} \rightarrow \min \tag{3.6}$$

при обмеженнях, відповідно до рекомендацій [97, 102]:

$$\left\{ \begin{array}{l} N_{\text{вид.п.с.зал}} \leq N_{\text{наявна.п.с.зал.марш}}, \\ N_{\text{мор.порт}} \leq N_{\text{мор.порт.зерн.}}, \\ \xi_{p1} \leq p(N_a) \leq \xi_{б.в.1}, \\ \xi_{p2} \leq p(N_{\text{ваг}}) \leq \xi_{б.в.2}, \\ \xi_{p3} \leq p(N_{\text{локом}}) \leq \xi_{б.в.3}, \\ \xi_{p4} \leq p(N_{\text{судно}}) \leq \xi_{б.в.4}, \\ \{N_a, N_{\text{ваг}}, N_{\text{локом}}, N_{\text{судно}}\} = \text{ціле}; \end{array} \right. \quad (3.7)$$

де  $p(N_a)$ ,  $p(N_{\text{ваг}})$ ,  $p(N_{\text{локом}})$ ,  $p(N_{\text{судно}})$  – фактичний рівень використання парку транспортних засобів, відповідно парку автомобілів, залізничних вагонів, суден;

$\xi_{p1}$ ,  $\xi_{p2}$ ,  $\xi_{p3}$ ,  $\xi_{p4}$  – нижня межа оптимального використання парку транспортних засобів, відповідно парку автомобілів, залізничних вагонів та локомотивів, суден;

$\xi_{б.в.1}$ ,  $\xi_{б.в.2}$ ,  $\xi_{б.в.3}$ ,  $\xi_{б.в.4}$  – верхня межа оптимального використання парку транспортних засобів, відповідно парку автомобілів, залізничних вагонів та локомотивів, суден.

Всі функції оптимізаційної моделі представлені у неявному вигляді, що робить їх практичну реалізацію складною. Найбільш доцільним та зручним способом реалізації зазначеної моделі є комп'ютерна симуляція.

### 3.3 Формалізація процесів транспортно-технологічної лінії доставки зернових у змішаному, автомобільно-залізнично-водному сполученні

Імітаційна модель процесу доставки зернових у змішаному автомобільно-залізнично-водному сполученні являтиме собою складний, багатофазний процес із множиною вихідних параметрів, підсистем та технологічних елементів.

Враховуючі особливості транспортного технологічного процесу, при розробці імітаційної моделі буде враховано дискретно-подієвий та агентний принципи:

- дискретно-подієвий (discrete-event) принцип буде застосовано для симуляції технологічних процесів багатофазового переходу вантажної маси, виробничих

ресурсів (зокрема транспортних одиниць) через відповідні об'єкти транспортної інфраструктури під час їх обробки, обслуговування тощо;

- агентний принцип буде застосовано для симуляції взаємодії різних підсистем та елементів в структурі загальної транспортно-технологічної системи доставки зернових.

Моделювання транспортно-технологічно лінії з доставки зернових представляє собою взаємодію множини транспортно-технологічних підсистем автомобільного, залізничного та морського транспорту. Кожна транспортна підсистема включає у себе підсистеми:

- накопичення та формування вантажної маси, необхідної до норми завантаження у транспортний засіб;
- завантаження та операцій по підготовці транспортного засобу у рейс;
- рух відповідної транспортної одиниці до пункту призначення або стикування з іншим видом транспорту.

Отже, процес функціонування транспортної підсистеми можна представити як типовий алгоритм (рисунок 3.1). Блок 1 відповідає процесу надходження вантажу до пункту накопичення (тимчасового зберігання) у пункті зародження або виготовлення зернових. Блок 2 та 3 симулюють цикл перевірки достатності вантажу до норми завантаження у транспортний засіб. Блок 4 визначає зумовлений процес пошуку вільної транспортної одиниці та вантажних засобів. Цей процес також можна представити як складний, однак стандартний та зумовлений цикл моніторингу зміни ситуації. Цей блок є найважливішим з точки зору виникнення затримок в часі через неузгодженість дій щодо надходження вантажу, підготовки у рейс транспортних засобів та формування достатньої кількості вантажних пристроїв.

Блок 5 також є зумовленим процесом руху транспортного засобу до пункту призначення або стикування із іншим видом транспорту. Зумовленим, оскільки у більшості залежить тільки від довжини маршруту та середньої (маршрутної) швидкості руху.

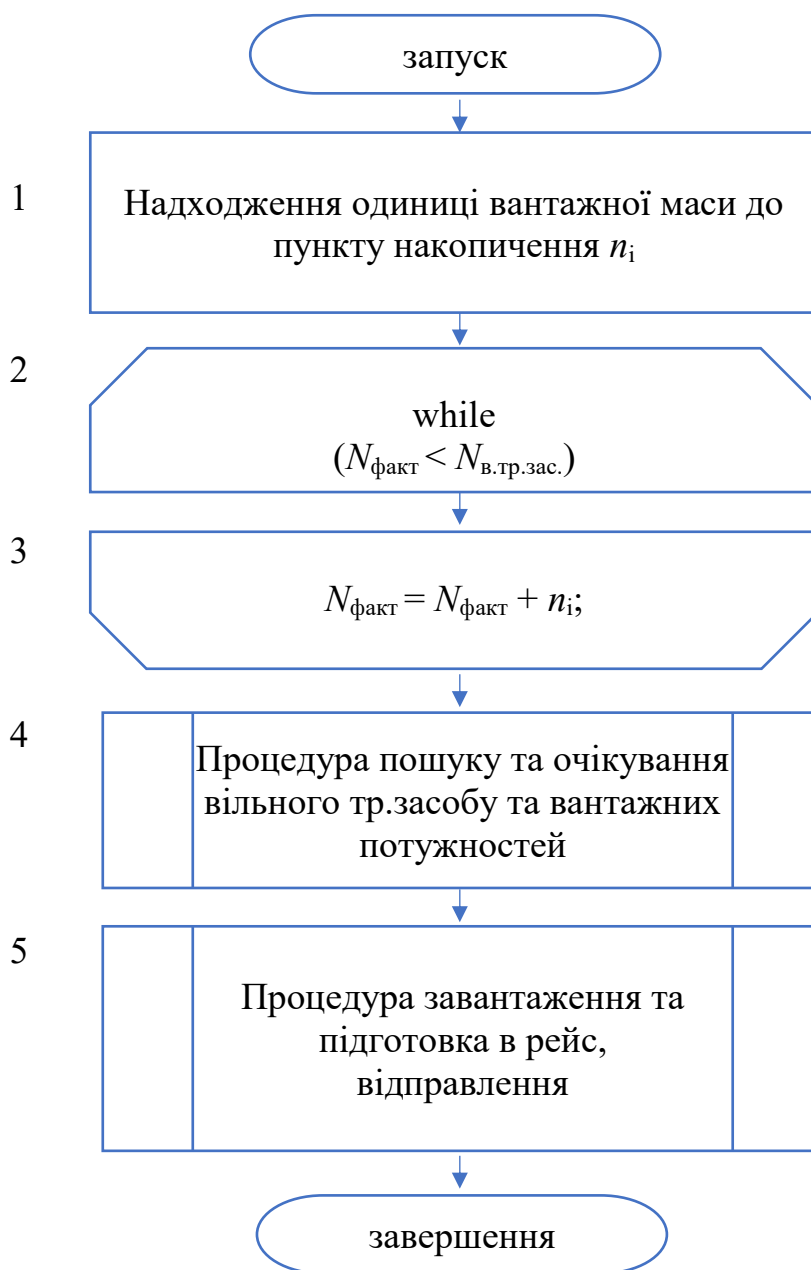


Рисунок 3.1 – Алгоритм функціонування транспортної підсистеми доставки зернових

$n_i$  – кількість вантажу, що надходить до пункту формування партії для відправлення;  $N_{\text{факт}}$  – фактичний обсяг вантажу, що є у наявності для завантаження у транспортний засіб;  $N_{\text{в.тр.зас.}}$  – технічна норма завантаження транспортного засобу.

Тоді всю транспортно-технологічну лінію доставки зернових можна представити як сукупність транспортних підсистем (рисунок 3.2), де  $k_n$  являє собою кількість транспортних підсистем.

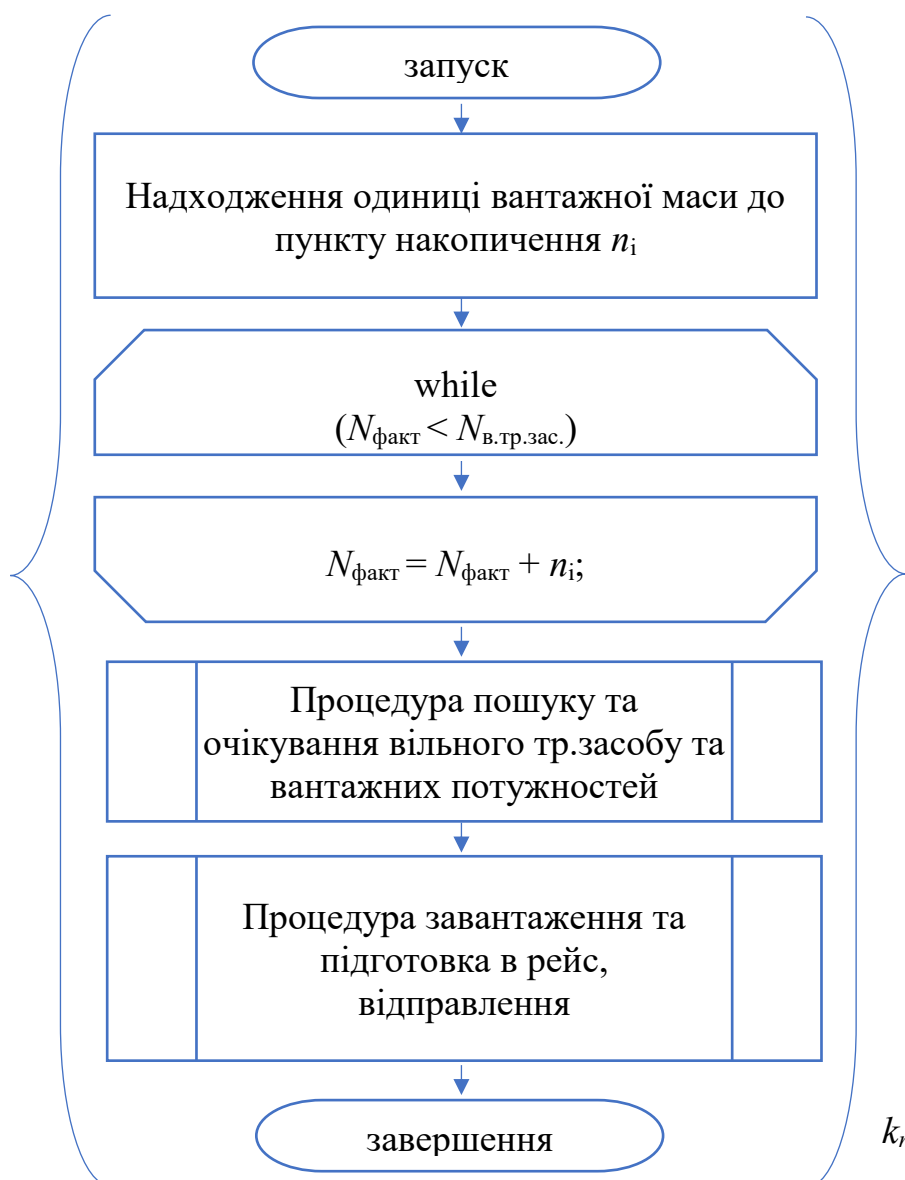


Рисунок 3.2 – Алгоритм функціонування транспортно-технологічної лінії з доставки зернових у змішаному автомобільно-залізнично-водному маршруті

Алгоритм функціонування транспортної підсистеми являє собою агент імітаційної моделі, тоді як набір процедур зазначеного алгоритму дискретно-подієвий перехід вимог між часовими блоками. Тому імітаційну транспортно-технологічної лінії з доставки зернових у змішаному автомобільно-залізнично-водному маршруті, доцільно розробляти на основі зазначених принципів.

### 3.4 Імітаційна модель процесу доставки зернових у змішаному автомобільно-залізнично-водному сполученні

Оскільки весь процес доставки зернових у глобальних ланцюгах постачання є багатофакторним, багатоелементним та достатньо складним, є доцільним розглянути доставку зернових тільки до моменту прибуття судна до порту призначення, оскільки друга частина зазначеного маршруту, тобто від прибуття до порту призначення до доставки до кінцевого пункту призначення, є аналогічною та повністю симетричною першій частині.

Отже, буде розроблено імітаційну модель процесу доставки зерна: автомобільним та залізничним транспортом до порту призначення, обробку суден в порту та відправлення. Також моделюється тривалість прямування балкера до порту призначення, проте не визначається потреба в судах. Крім того, саме така частина процесу більш притаманна функціонуванню транспорту України в частині забезпечення сталого експорту зернових у глобальних ланцюгах постачання.

У відповідності із агентним принципом сформовано наступні агенти [97, 102, 116] (таблиця 3.1).

Таблиця 3.1 – Специфікація агентів імітаційної моделі

Найменування агента	Функція агента
Автомобільна лінія	<p>Моделювання процесу надходження та накопичення вантажу до норми маси завантаження у вантажний автомобіль.</p> <p>Моделювання процесу управління наявним парком вантажних автомобілів.</p> <p>Моделювання процесу очікування вільних вантажних пристроїв та пунктів завантаження.</p> <p>Моделювання руху вантажних автомобілів у повному циклі вантажного обороту.</p>
Залізнична лінія	<p>Моделювання процесу надходження та накопичення вантажу до норми маси завантаження у залізничний маршрут.</p> <p>Моделювання процесу управління наявним парком вантажних вагонів та локомотивів.</p> <p>Моделювання процесу очікування вільних вантажних пристроїв та пунктів завантаження.</p> <p>Моделювання руху зернових маршрутів у повному циклі вантажного обороту.</p>

Таблиця 3.1 (продовження)

Найменування агента	Функція агента
Морська лінія	<p>Моделювання процесу надходження та накопичення вантажу до норми маси завантаження у морське судно (балкер).</p> <p>Моделювання процесу управління наявним парком вантажних суден.</p> <p>Моделювання процесу очікування вільних вантажних потужностей.</p> <p>Моделювання руху морських суден у повному циклі вантажного обороту.</p>
Ордер	Моделювання інформаційного повідомлення щодо процесу формування вантажної маси.
Парк вантажних автомобілів	Популяція агентів типу «вантажний автомобіль» для моделювання якості використання наявного парку транспортних засобів автомобільного транспорту.
Парк вантажних вагонів (зерновозів) та локомотивів для організації зернових маршрутів	Популяція агентів типу «залізничний маршрут» для моделювання якості використання наявного парку транспортних засобів залізниці.
Парк вантажних суден (балкерів)	Популяція агентів типу «балкер» для моделювання якості використання наявного парку транспортних засобів морського транспорту.
Пункти відправлення зернових	Популяція агентів типу «пункт відправлення» для моделювання маршрутів відправлення автомобілів із зерновими при первинному накопиченні зерна
Залізнична станція	Агент типу «залізнична станція» для моделювання організації залізничних маршрутів
Морський порт	Агент типу «морський порт» для моделювання організації завантаженого судна із зерном

### 3.4.1 Налаштування агенту Main

Головним агентом, що забезпечує взаємодію всіх інших агентів між собою, є агент Main. Такий порядок обумовлений стандартною процедурою розробки проектів у середі розробки Java SE.

Головним елементом агенту Main є елемент розмітки простору – GIS карта, що дозволяє розробляти процеси руху агентів по мітках діючих карт залізничного, автомобільного та морського транспорту (Додаток Б, рисунок Б.1).

Крім того, агент Main включає у себе всі ключові параметри транспортно-технологічної лінії у вигляді гіперпосилань типу Parameters:

- truckNumber\_Polt – прийнята кількість автомобілів, що задіяні у перевізному процесі, одиниць;
- truckCapacity – прийнята технічна норма завантаження (вантажомісткість) автомобіля, тонн;
- truckSpeed – середня (маршрутна) швидкість руху вантажних автомобілів, км/год;
- railNumber – прийнята кількість залізничних маршрутів (вагонів із локомотивами), одиниць;
- railCapacity – прийнята технічна норма завантаження (нетто-тонн) залізничного маршруту, тонн;
- railSpeed – маршрутна швидкість руху залізничних маршрутів, км/год;
- shipNumber – прийнята кількість морських суден, одиниць;
- shipCapacity – прийнятий чистий дедвейт (deadweight cargo capacity, скор. DWCC), тонн;
- shipSpeed – середня (маршрутна) швидкість судна, км/год.

Крім презентації самої моделі на агент Main виносяться діаграми статистичних результатів моделювання: часу доставки та потрібної місткості пунктів перевалки зерна.

#### 3.4.2 Налаштування популяції агентів «Пункти відправлення зернових»

Популяція агентів «Пункти відправлення зернових» є початковою при моделювання процесу доставки зернових та імітує первинне накопичення зернових до кількості, необхідної для завантаження у машину.

Сам процес являє собою звичайний дискретно-подієвий, що складається тільки з двох елементів: генератору вимог source та закінчення процесу надходження зернових sink (рисунок 3.3).

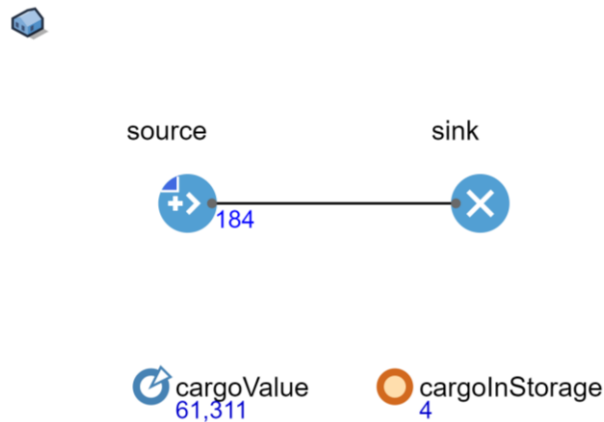


Рисунок 3.3 – Дискретно-подієвий процес популяції агентів «Пункти відправлення зернових»

Генератор вимог генерує найпростіший (експонентний) потік вимог зі встановленою (наявною) середньою інтенсивністю  $\lambda_{\text{зерн}}$  із щільністю розподілу імовірності:

$$\begin{cases} \lambda_{\text{зерн}} e^{-\lambda_{\text{зерн}} x}, & x > 0, \\ 0, & x < 0, \end{cases} \quad (3.8)$$

де  $\lambda_{\text{зерн}}$  – середня інтенсивність потоку вимог зернових до пункту первинного накопичення до завантаження у автомобілі, тонн/рік.

Кожна вимога, що генерується блоком source, являє собою одну тону зерна. При надходженні вимоги до елемента sink реалізується алгоритм формування інформаційної заявки (агенту популяції Order) щодо готової до відправлення партії вантажу завантаження у одну вантажну машину (рисунок 3.4).

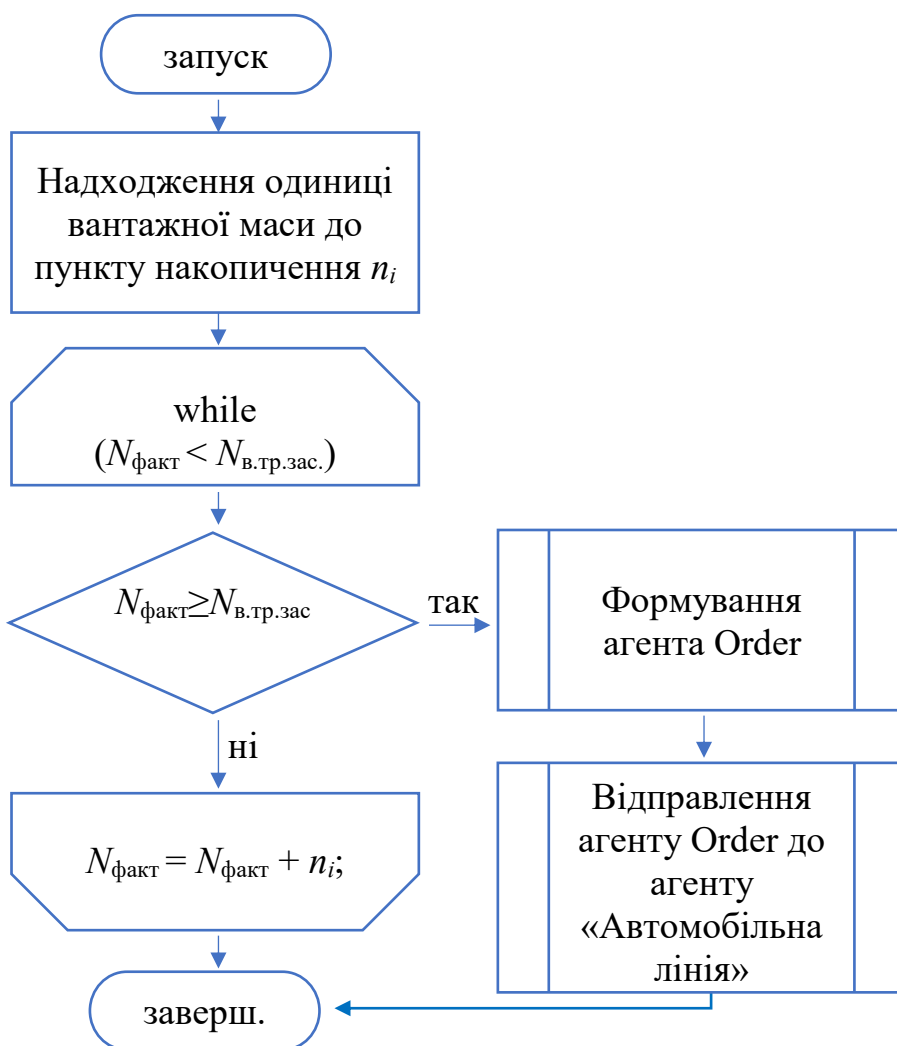


Рисунок 3.4 – Алгоритм формування агента популяції Order

Алгоритм, що зазначено на рисунку 3.4, реалізується при кожному надходженні вимоги за допомоги Java-коду:

```

cargoInStorage++;

if (cargoInStorage >= main.truckCapacity){
    Order newOrder = new Order ( this );
    send ( newOrder, main.store_Poltava );
    cargoInStorage -= main.truckCapacity;
}
  
```

Кожен агент популяції «Пункти відправлення зернових» імітує процес незалежно від інших, таким чином здійснюється імітація накопичення та формування відправок по кожному з пунктів відправлення зернових у обраному регіоні.

### 3.4.3 Налаштування агентів «Автомобільна лінія», «Залізнична лінія» та «Морська лінія»

Агенти «Автомобільна лінія», «Залізнична лінія» та «Морська лінія», за своїм функціональним призначенням, призначенні для імітації обороту відповідних транспортних засобів при організації перевезення партії вантажів.

Процес транспортування зернових починається із накопичення зерна до необхідної норми завантаження у вантажний автомобіль (популяція агентів «Пункти відправлення зернових»). Після отримання інформаційного повідомлення про достатню кількість вантажу у певному пункті відправлення це повідомлення передається до блоку enter агенту «Автомобільна лінія». Після цього інформаційне повідомлення потрапляє до елемента seize, в якому здійснюється захоплення вільного ресурсу — вантажного автомобіля із елемента truck. При відсутності вільного автомобіля вимога на перевезення зерна залишається в очікуванні. Процедура імітації обороту вантажного автомобіля зазначена у Додатку Б, рисунок Б.2.

При наявності вільного автомобіля здійснюється імітація повного вантажного обороту на маршруті прямування від пункту зародження вантажної маси до пункту перевантаження у залізничний вагон:

- блок moveTo – імітація порожнього пробігу від місця постійної дислокації до місця завантаження автомобіля;
- блок delay – імітація витрат часу на завантаження автомобіля;
- блок moveTo1 – імітація вантажного рейсу автомобіля до пункту перевантаження у вагон;
- блок delay1 – імітація витрат часу на вивантаження автомобіля.

Після імітації вивантаження автомобіль переміщується у блок truck і далі представлятиме вільний для використання ресурс. Таким чином даний підхід дозволяє симулювати повний цикл технологічних операцій, пов'язаних із одним вантажним перевезенням.

Водночас у блоці delay1 (вивантаження) реалізується алгоритм формування вантажної маси для можливості завантаження у залізничні вагони (рисунок 3.5).

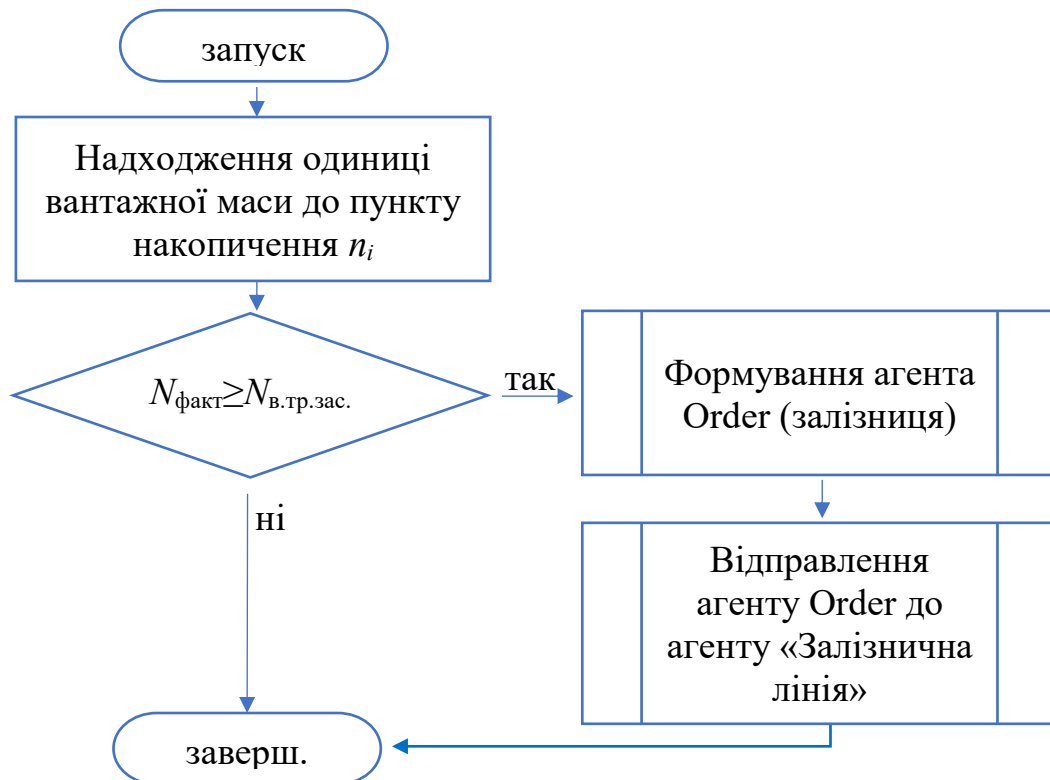


Рисунок 3.5 – Алгоритм формування вантажної маси для завантаження у залізничний відправницький маршрут

Алгоритм, наведений на рисунку 3.5, реалізується за допомогою Java-коду:

```

«inStorage += main.truckCapacity;
if(inStorage >= main.railCapacity){
  main.railLine.source.inject(1);
  inStorage -= main.railCapacity;
}»
  
```

Кінцевим результатом виконання цього коду є те, що при накопиченні потрібного для завантаження відправницького маршруту обсягу вантажу створюється інформаційне повідомлення у агенті «Залізнична лінія».

Процедура імітації обороту залізничного відправницького маршруту (Додаток Б, рисунок Б.3) та обслуговування морського судна (балкера) у порту (Додаток Б, рисунок Б.4), по суті, є аналогічною агенту «Автомобільна лінія».

Всі технологічні операції в зазначених агентах – рух, завантаження, вивантаження та інші – можуть симулюватись як дискретні, так і неперервні.

Представлений підхід дозволяє симулювати централізоване управління парком транспортних засобів на мережі розвезення або звезення вантажів. Такий підхід особливо актуальний для організації дистрибутивної логістики автомобільним транспортом, де наявна множина пунктів зародження вантажів та складів консолідації зерна. Крім того, зазначений підхід також актуальний для залізничного транспорту, оскільки станцій формування зернових маршрутів, що виступатимуть у якості маршрутних баз, також може бути декілька у межах однієї транспортно-технологічної лінії.

Навіть при укрупненій симуляції експорту зернових з України може виникнути проблема у використанні одразу декількох альтернативних морських торговельних терміналів у різних портах, що також дозволить симулювати розгалужену мережу.

### 3.5 Припущення та обмеження при розробці моделі

При розробці моделі вважається, що:

- вхідні потоки зернових до транспортної системи є найпростішими, оскільки формуються у вільному середовищі із множини аграрних і фермерських підприємств;
- оскільки потік найпростіший, його інтенсивність підпорядкована експонентному розподілу та розподілу Пуассона;

- наявні пропускні спроможності автомобільних і залізничних шляхів сполучення та суднохідних каналів є достатніми та не мають ніяких обмежень для руху протягом доби та пори року;

- всі черги у системах масового обслуговування та управлінні ресурсів підпорядковані принципу FIFO – «перший прийшов, перший пройде обслуговування»;

- тривалість технологічних операцій із завантаження / вивантаження та тривалості обслуговування у пунктах обороту або відстоюю приймаються типовими відповідно до існуючих рекомендацій із використання та обслуговування транспортних засобів автомобільного, залізничного та водного транспорту, а також Єдиних технологічних процесів взаємодії залізничній станцій із морськими торговельними портами та під'їзними коліями;

- всі системи масового обслуговування не мають обмежень по кількості місць у чергах.

### 3.6 Забезпечення достовірності результатів моделювання

Процес моделювання в розробленій імітаційній моделі є стохастичним і таким, що базується на модельному часі виконання. Для таких моделей результат моделювання у більшості залежить від тривалості модельного часу та сумарної кількості реплікацій експериментів [117]. Зазначена методика справедлива тільки тоді, коли результат моделювання, як випадкова величина, підпорядкована нормальному розподілу.

Тому, для встановлення мінімально-необхідної кількості реплікацій та мінімально-необхідного модельного часу виконана серія експериментів, де ключовим та системним параметром заміру моделювання виступає загальний час доставки зерна по суші від пункту зародження вантажу до морського торговельного терміналу. Насамперед вибірка генеральної сукупності експериментальних даних перевіряється на гіпотезу щодо апроксимації нормальним законом. Отримані результати зазначені на рисунку 3.6, таблиця 3.2.

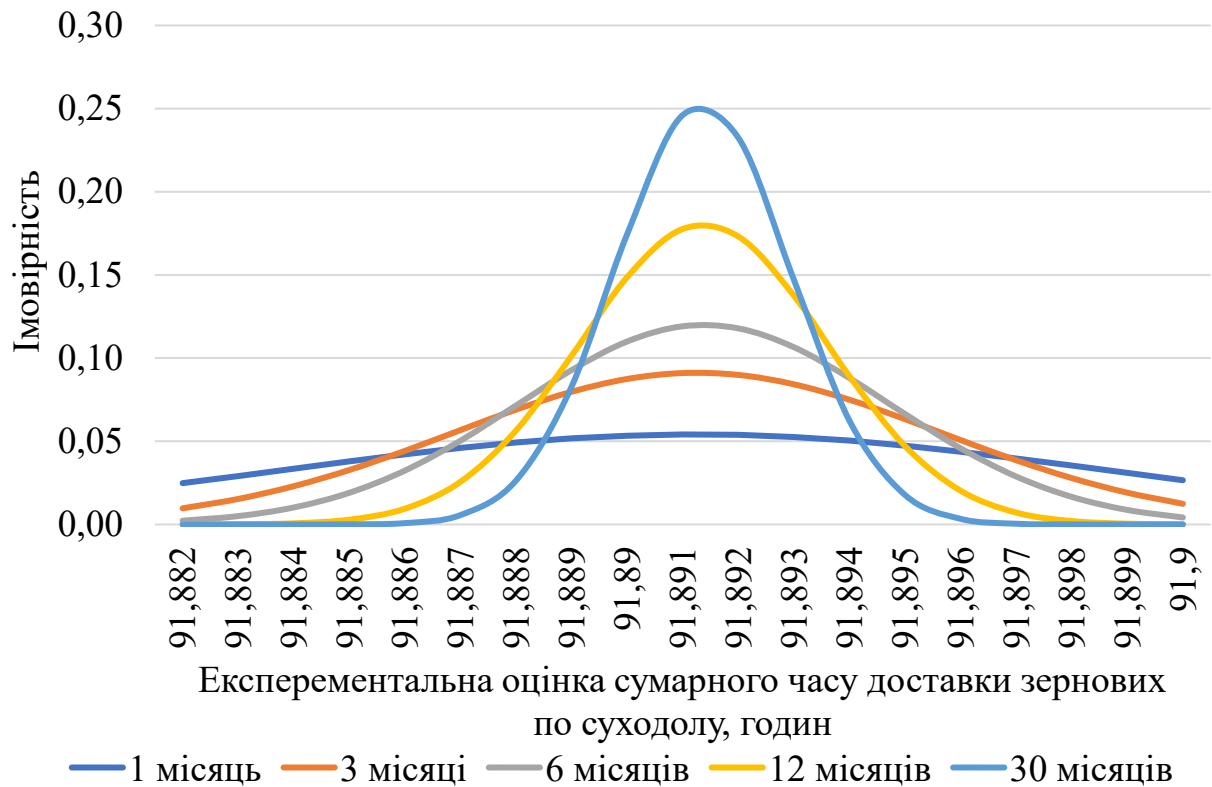


Рисунок 3.6 – Апроксимація нормальним розподілом експериментальних даних щільності розподілу середнього часу доставки зернових залізничним та автомобільним транспортом, залежно від тривалості модельного часу

Таблиця 3.2 – Експериментальна оцінка вибірок залежно від тривалості модельного часу

Експериментальна оцінка сумарного часу доставки зернових по суші, годин	1 місяць	3 місяці	6 місяців	12 місяців	30 місяців
91,882	0,02	0,009697	0,002245	2,31045E-05	6,08546E-09
91,883	0,03	0,015327	0,00501	0,000141228	2,11595E-07
91,884	0,03	0,022992	0,010216	0,00070393	4,92853E-06
91,885	0,04	0,032735	0,01903	0,002861051	7,69003E-05
91,886	0,04	0,044234	0,032385	0,009482187	0,000803781
91,887	0,05	0,056729	0,05035	0,025625823	0,005627904
91,888	0,05	0,069052	0,071516	0,056472062	0,026397014
91,889	0,05	0,079772	0,0928	0,101478948	0,082939639
91,89	0,05	0,087466	0,110013	0,148697872	0,174569616
91,891	0,05	0,091021	0,119148	0,17767243	0,246135557

Таблиця 3.2 (продовження)

91,892	0,05	0,089898	0,117889	0,173109866	0,232476598
91,893	0,05	0,08427	0,106563	0,137534004	0,147090054
91,894	0,05	0,074974	0,088001	0,089101465	0,062342837
91,895	0,05	0,063307	0,066392	0,047070205	0,017700641
91,896	0,04	0,050735	0,04576	0,020276539	0,003366593
91,897	0,04	0,03859	0,028814	0,007122428	0,000428935
91,898	0,04	0,027859	0,016576	0,002040087	3,66093E-05
91,899	0,03	0,019087	0,008711	0,000476492	2,0931E-06
91,9	0,03	0,012412	0,004183	9,07506E-05	8,01658E-08

З рисунка 3.6 видно: що більшою є тривалість модельного часу, то меншою є дисперсія вибірки, а отже, результати експериментів будуть достовірнішими.

Для оцінки довірчого інтервалу було визначено ліві та праві межі вибірки, відповідно до рівня 95% (рисунок 3.7).

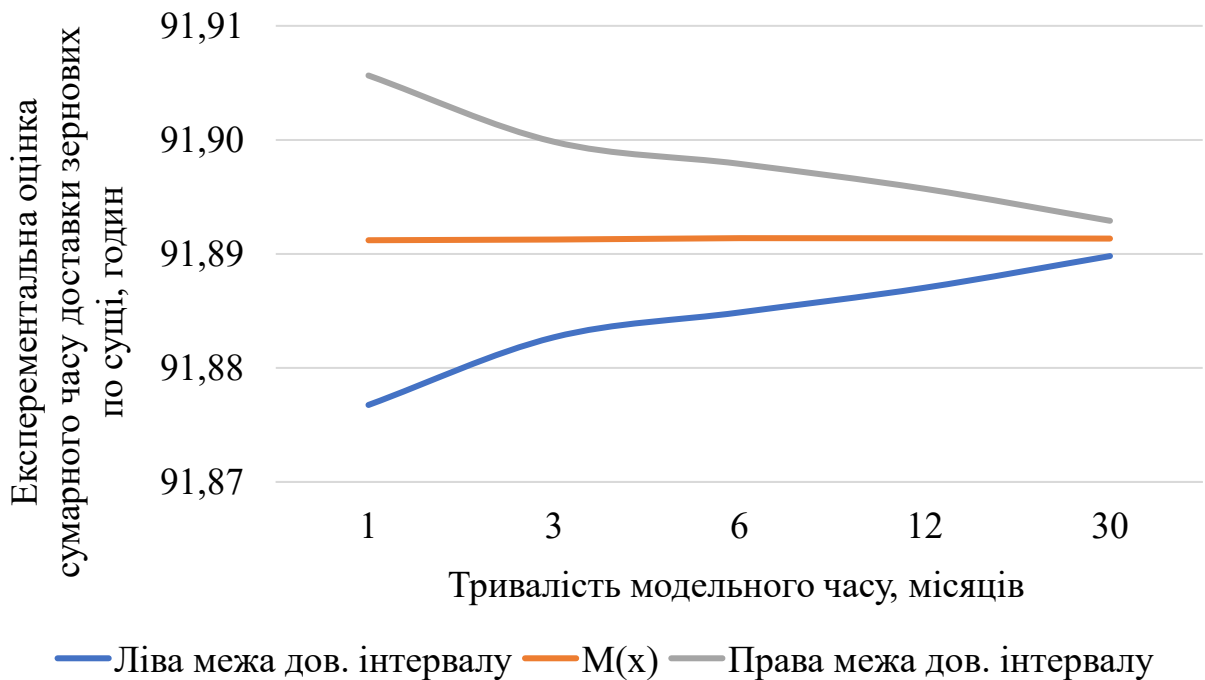


Рисунок 3.7 – Експериментальна оцінка довірчих інтервалів вибірок при рівні значимості 95%

Після експериментальної оцінки вибірок, а саме математичного сподівання та стандартного відхилення, відповідно до рекомендацій [2, 114, 118] встановлено граничні значення серії реплікацій та тривалості модельного часу (таблиці 3.3, 3.4).

Таблиця 3.3 – Результати оцінки математичного сподівання та стандартного відхилення вибірок

Тривалість модельного часу	1 місяць	3 місяці	6 місяців	12 місяців	30 місяців
$m'$	91,891	91,891	91,891	91,891	91,891
$s'$	0,007	0,004	0,003	0,002	0,002

Таблиця 3.4 – Результати оцінки математичного сподівання та стандартного відхилення вибірок

Тривалість модельного часу		1 місяць	3 місяці	6 місяців	12 місяців	30 місяців
Довірчий інтервал	Ліва межа дов. інтервалу	91,877	91,883	91,885	91,887	91,890
	$M(x)$	91,891	91,891	91,891	91,891	91,891
	Права межа дов. інтервалу	91,906	91,900	91,898	91,896	91,893
Кількість реплікацій	Розрахункове значення	2,47	0,87	0,50	0,22	0,11
	Граничне ціле значення	3	1	1	1	1

Таким чином, навіть при тривалості модельного часу у 3 місяці достатньо однієї реплікації для забезпечення достовірності у 95%.

### 3.7 Висновки по розділу 3

Формалізовано процес доставки зернових у глобальних ланцюгах постачання шляхом розробки математичної (імітаційної) моделі з визначеним критерієм оптимізації. Як критерій оптимізації обрано час доставки, який є ключовим показником ефективності транспортно-технологічної системи. Розроблена модель враховує основні складові часу перевезення, зокрема використання автомобільного, залізничного та морського транспорту. Цільова функція моделі представлена в неявному вигляді, що потребує її реалізації за допомогою комп'ютерної імітації.

Імітаційна модель процесу доставки зернових у змішаному автомобільно-залізнично-водному сполученні враховує багатофазовий і складний характер цього процесу з багатьма вихідними параметрами, підсистемами та технологічними елементами. Для цього застосовано гібридний підхід, що об'єднує:

1) дискретно-подієвий принцип, який використовується для симуляції технологічних процесів, таких як обробка вантажів і обслуговування транспортних одиниць на об'єктах транспортної інфраструктури;

2) агентний принцип, який дозволяє моделювати взаємодію різних підсистем та елементів у загальній транспортно-технологічній системі доставки зернових.

Для забезпечення достовірності результатів проведено серію експериментів із однаковою кількістю реплікацій (400 реплікацій) та різною тривалістю модельного часу (від 1 до 30 місяців). Встановлено, що за граничного значення однієї реплікації та модельного часу не менше трьох місяців забезпечується достовірність результатів на рівні 95% із похибкою, що не перевищує 0,05.

Для практичного використання теоретичних положень, запропонованих у цьому розділі, у четвертому розділі необхідно реалізувати модель на прикладі одного з типових для України ланцюгів постачання зернових. Це дозволить визначити числові значення оптимальних параметрів транспортно-технологічної системи постачання зернових у змішаному автомобільно-залізнично-водному сполученні. Основними завданнями є:

1. Реалізація моделі на основі обраного типового ланцюга постачання зернових, що забезпечить перевірку достовірності отриманих теоретичних висновків.

2. Визначення оптимальних параметрів функціонування транспортно-технологічної системи, зокрема для кожного етапу змішаного сполучення: автомобільного, залізничного та водного транспорту.

3. Встановлення закономірностей впливу змін ключових параметрів транспортно-технологічної лінії на ефективність функціонування транспортної системи, таких як:

- загальний час доставки вантажів;
- завантаженість парку транспортних засобів;
- обсяг надлишкової вантажної маси на пунктах перевантаження.

## РОЗДІЛ 4

### РОЗРОБКА ПРАКТИЧНИХ РЕКОМЕНДАЦІЙ ЩОДО ВДОСКОНАЛЕННЯ ТЕХНОЛОГІЧНИХ ЛІНІЙ ДОСТАВКИ ЗЕРНОВИХ У ЗМІШАНОМУ СПОЛУЧЕННІ

4.1 Встановлення оптимальних параметрів транспортно-технологічної лінії постачання зернових у змішаному автомобільно-залізнично-водному сполученні

Одними із найактивніших регіонів із виробництва зернових зернобобових та олійних культур України залишаються Полтавська та Дніпропетровська області (рисунки 2.3-2.7). Отже, на прикладі зародження зернової маси для експортного сполучення у зазначених областях буде імітуватись початок ланцюга постачання зернових.

Пошук оптимальних параметрів транспортно-технологічної лінії постачання зернових у змішаному автомобільно-залізнично-водному сполученні проводився на прикладі реального ланцюга постачання зернових з України (Східні та Центральні регіони України) через морські торговельні порти Великої Одеси: МТП Чорноморськ, Одеса та Південний. Даний ланцюг постачання є найбільш типовим для реалій України при організації експортних поставок зернових на глобальні ринки, тобто за участю морського транспорту.

Інструментом дослідження та визначення оптимальних параметрів була розроблена в третьому розділі цієї дисертаційної роботи імітаційна модель. Оптимізація моделі проводилась відповідно до розробленої цільової функції (3.6) та обмежень (3.7) оптимізаційної задачі.

Пунктами первинного накопичення зернової маси виступають чотирнадцять регіональних центрів Полтавської області:

1. Оржиця.
2. Диканька.
3. Великі Сорочинці.
4. Полтава Південна.

5. Ромодан.
6. Бутенки.
7. Пирятин.
8. Глобине.
9. Гадяч.
10. Білоцерківка.
11. Зіньків.
12. Заводське.
13. Карлівка.
14. Нові Санжари.

Після накопичення до необхідних партій відправки автомобільним транспортом зернові постачаються до залізничної станції Кременчук, де здійснюється накопичення до норм завантаження у залізничній рухомий склад та формування зернових залізничних маршрутів.

Далі зерновими залізничними маршрутами зернові постачаються до Одеського морського торговельного порту, де здійснюється накопичення та завантаження до морських торговельних суден – балкерів.

Вихідні дані з формування вантажопотоків наведені у таблиці 4.1. При моделюванні буде вважатись, що обсяги формування вантажопотоків, зазначених в таблиці 4.1 регіонах, є однаковими. Інтенсивність зародження вантажопотоків у межах області є приблизно рівномірною. Це припущення не є суттєвим і відображає загальну динаміку формування вантажопотоків та їх збільшення на перспективу до 2030 року. Водночас, імітаційна модель дозволяє моделювати процес постачання зернових у випадках нерівномірного розподілу вантажопотоків за пунктами їхнього відправлення.

Таблиця 4.1 – Вихідні обсяги відправлення вантажів (зернових) по основних пунктах Полтавської області.

Пункт зародження вантажної маси	Обсяг виробництва за даними 2021 року, тонн	Розрахунковий обсяг, тонн	Прогнозований обсяг для 2030 року (оптимістичний), тонн
Оржиця	63111	71429	107143
Диканька	63111	71429	107143
Великі Сорочинці	63111	71429	107143
Полтава	63111	71429	107143
Ромодан	63111	71429	107143
Бутенки	63111	71429	107143
Пирятин	63111	71429	107143
Глобине	63111	71429	107143
Гадяч	63111	71429	107143
Білоцерківка	63111	71429	107143
Зіньків	63111	71429	107143
Заводське	63111	71429	107143
Карлівка	63111	71429	107143
Нові Санжари	63111	71429	107143
Разом по Полтавській області	883560	1000000	1500000

Вихідні технологічні параметри транспортного процесу зазначені у таблиці 4.2.

Таблиця 4.2 – Техніко-експлуатаційні характеристики транспортних засобів та одиниць транспортного процесу імітаційного моделювання

Показник	Одиниця виміру	Кількість одиниць
1. Середня технічна швидкість:		
– вантажних автомобілів	км/год	60
– залізничних кільцевих (відправницьких) маршрутів	км/год	35
– суден (балкерів)	км/год	15 <sup>1</sup>
2. Технічна норма завантаження:		
– вантажних автомобілів	тонн	20
– залізничних кільцевих (відправницьких) маршрутів	тонн	4000
– суден (балкерів)	тисяч тонн	50 <sup>2</sup>

Примітка: <sup>1</sup> для даного пункту розуміється крейсерська швидкість

<sup>2</sup> для даного пункту розуміється чистий дедвейт

Технологічні параметри елементів транспортного процесу зазначені у таблиці 4.3, 4.4.

Таблиця 4.3 – Формування маршрутів доставки автомобільним транспортом

Параметр	Одиниця виміру	Кількість одиниць
Довжина автомобільного маршруту:		
Оржиця – Кременчук	км	Встановлюється програмно через застосування GIS технологій та шейп-файлів маршрутів ( <i>shapefiles</i> )
Диканька – Кременчук	км	
Великі Сорочинці – Кременчук	км	
Полтава – Кременчук	км	
Ромодан – Кременчук	км	
Бутенки – Кременчук	км	
Пирятин – Кременчук	км	
Глобине – Кременчук	км	
Гадяч – Кременчук	км	
Білоцерківка – Кременчук	км	
Зіньків – Кременчук	км	
Заводське – Кременчук	км	
Карлівка – Кременчук	км	
Нові Санжари – Кременчук	км	
Довжина залізничного маршруту:		
Кременчук - Одеса Порт	км	

При розробці та реалізації імітаційних моделей були враховані такі припущення:

1. Технологічний процес транспортування вантажів на кожному етапі ланцюга постачання є раціональним і таким, що відповідає діючим інструкціям і технологічним нормам.

2. Наявна пропускна та переробна спроможність транспортних ліній і шляхів сполучення є достатньою для автомобільної, залізничної і морської транспортно-технологічних систем.

3. Процес транспортування здійснюється у стандартних умовах без додаткових збоїв і позаштатних ситуацій.

4. Рівень негативного впливу людського фактору на здійснення перевізного процесу є прийнятним та несуттєвим.

5. Графік руху транспортних засобів є ритмічним і вільним. Процес завантаження та відправлення автомобілів, залізничних маршрутів і морських суден здійснюється за фактом накопичення вантажу до норми завантаження транспортного засобу.

Таблиця 4.4 – Характеристика та параметри основних витрат часу на виконання технологічних операцій

Параметр	Одиниця виміру	Кількість одиниць	Примітка
Норми часу вантажного обороту:			
1) вантажних автомобілів:			
час руху до пункту завантаження	год		розрахункова
час перебування у пункті завантаження*	год	$M(t) = 2,0$	triangular(0,75M(t), M(t), 1,5 M(t))
час руху до пункту вивантаження	год		розрахункова
час перебування у пункті вивантаження	год	$M(t) = 1,5$	triangular(0,75M(t), M(t), 1,5 M(t))
2) залізничних маршрутів:			
час руху до пункт завантаження	год		розрахункова
час перебування у пункті завантаження*	год	$M(t) = 24$	triangular(0,5M(t), M(t), 1,5 M(t))
час руху до пункту вивантаження	год		розрахункова
час перебування у пункті вивантаження	год	$M(t) = 24$	triangular(0,5M(t), M(t), 1,5 M(t))
3) час завантаження та перебування судна у порту	діб	$M(t) = 5$	triangular(0,9M(t), M(t), 1,3 M(t))

*Примітка:* \*тут і далі враховується тільки час виконання вантажних, початково-кінцевих та інших операцій, і не враховується час очікування виконання технологічних операцій. Час затримок та очікування виконання технологічних операцій розраховуються програмно при реалізації імітаційної моделі.

Для пошуку оптимального рішення в середовищі AnyLogic University Researcher було розроблено експеримент оптимізації відповідно до цільової функції (3.6) та обмежень (3.7) оптимізаційної математичної моделі. Критерієм оптимізації

виступає загальний час доставки партії зернових сушею, тобто від пункту зародження до морського торговельного порту Одеса, завантаження та моменту прибуття судна до порту призначення, що визначається функцією збору статистики `root.dataTimeDeliveryToSeaPort.mean()`, змінними – парки транспортних засобів відповідно вантажних автомобілів (`truckNumber_Polt`) та залізничних маршрутів (`railNumber`). Вікно налаштування експерименту оптимізації зазначено у Додатку В, рисунок В.1.

Експеримент було проведено для трьох значень обсягів перевезень (таблиця 4.1). Результати оптимізації зведено у таблицю 4.5.

Таблиця 4.5 – Оптимальні значення розмірів робочих парків вантажних автомобілів та залізничних відправницьких маршрутів

Експеримент оптимізації	Загальний вантажопотік, тонн/рік	Парк вантажних автомобілів		Парк залізничних маршрутів		Розрахункове значення цільової функції (3.6), годин
		Оптимальне значення, одиниць	Розрахункове завантаження парку	Оптимальне значення, одиниць	Розрахункове завантаження парку	
Експеримент 1	883560	79	0,54	3	0,63	322,63
Експеримент 2	1000000	92	0,52	4	0,54	292,82
Експеримент 3	1500000	106	0,68	5	0,64	217,823

Щільність імовірності розподілу часу перебування зернової маси в автомобільній транспортній системі та їх характеристики представлені на рисунку 4.1 та в таблиці 4.6. З отриманих даних видно, що щільність розподілу зазначеного показника є симетричною та близькою до нормального з суттєвою варіацією у діапазоні 0,33-0,40. Математичне сподівання часу знаходження вантажу в автомобільній транспортній системі має зворотно пропорційний зв'язок із

середньодобовим обсягом перевезень. Зазначений результат пояснюється тим, що середній час накопичення вантажу до норми завантаження у транспортний засіб тим менший, чим більша інтенсивність надходження цієї вантажної маси до пункту відправлення.

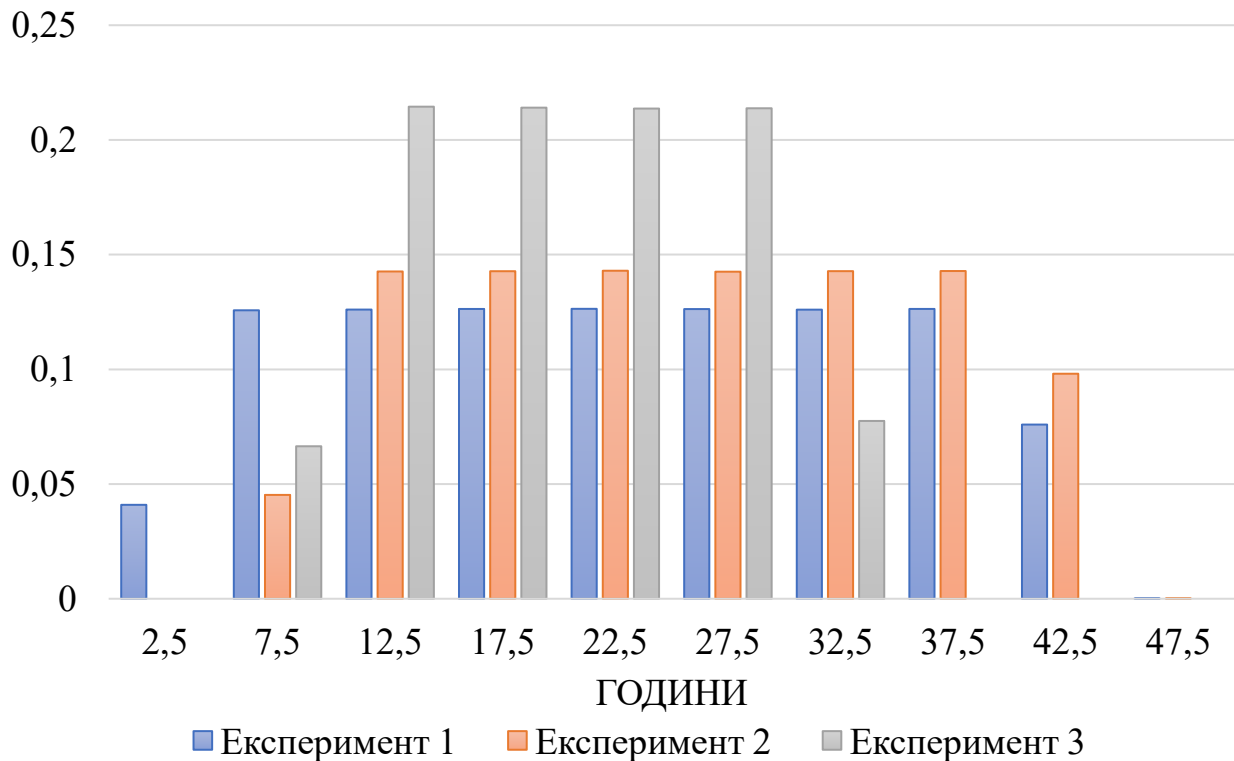


Рисунок 4.1 – Щільність імовірності розподілу часу перебування вантажу у автомобільній системі

Таблиця 4.6 – Показники щільності розподілу часу перебування вантажу у автомобільній системі

Експеримент оптимізації	Обсяг вибірки, одиниць	Значення показника, годин			Стандартне відхилення	Коеф. варіації
		Min	M(x)	Max		
Експеримент 1	243400	7,4	28,2	50,0	11,4	0,406
Експеримент 2	275400	7,6	25,9	45,2	10,1	0,390
Експеримент 3	412800	7,5	20,1	33,1	6,8	0,336

У результаті проведення серії експериментів для різних обсягів формування зернової маси, що відправлена на експорт, та оптимальних значень парку транспортних засобів вантажних автомобілів та залізничних маршрутів (таблиця 4.6)

були отримані наступні дані. Результати наочно характеризують рівень ефективності організації мультимодального ланцюга постачання зернових при різних річних обсягах.

Для залізничної транспортної системи отримані схожі за характером результати розподілу (рисунок 4.2 та таблиця 4.7). Так, щільність розподілу часу перебування вантажу в залізничній системі також має симетричну природу для результатів трьох експериментів і ще більшу варіацію показника: від 0,42 до 0,48.

Аналогічно з попередніми показниками, математичні сподівання та коефіцієнти варіації щільності розподілу показників мають зворотно пропорційне значення до обсягу відправлення зернових.

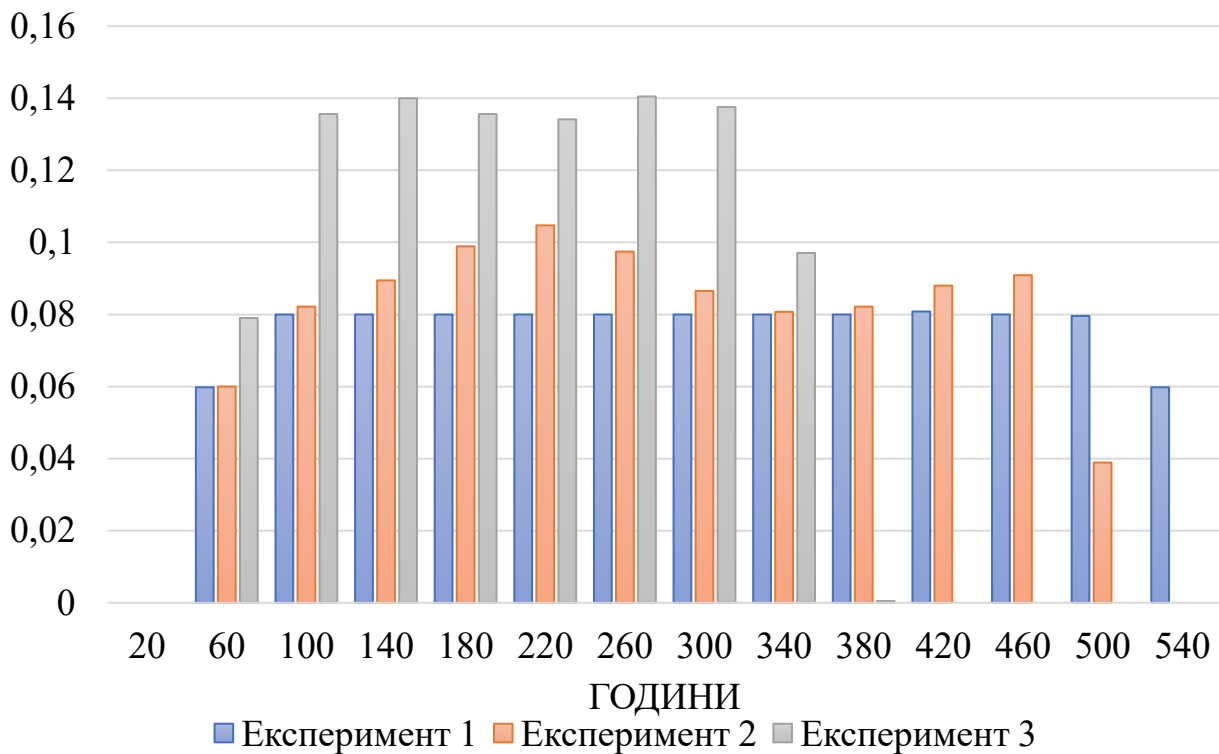


Рисунок 4.2 – Щільність імовірності розподілу часу перебування вантажу у залізничній системі

Таблиця 4.7 – Показники щільності розподілу часу перебування вантажу у залізничній системі

Експеримент оптимізації	Обсяг вибірки, одиниць	Значення показника, годин			Стандартне відхилення	Коеф. варіації
		Min	M(x)	Max		
Експеримент 1	242500	45,6	300,0	554,4	143,7	0,49
Експеримент 2	275000	46,4	271,8	500,0	127,1	0,47
Експеримент 3	410000	47,3	202,9	362,7	85,0	0,42

Щільність розподілу часу очікування автомобілем вантажу для завантаження та перевезення має чітко виражену симетричну природу та апроксимується нормальним законом розподілу (рисунок 4.3, таблиця 4.8). В усіх трьох випадках проведення експериментів коефіцієнт варіації становить менше 10%, що свідчить про низьку дисперсію вибірки та сталість процесу очікування транспортними засобами вантажної маси.

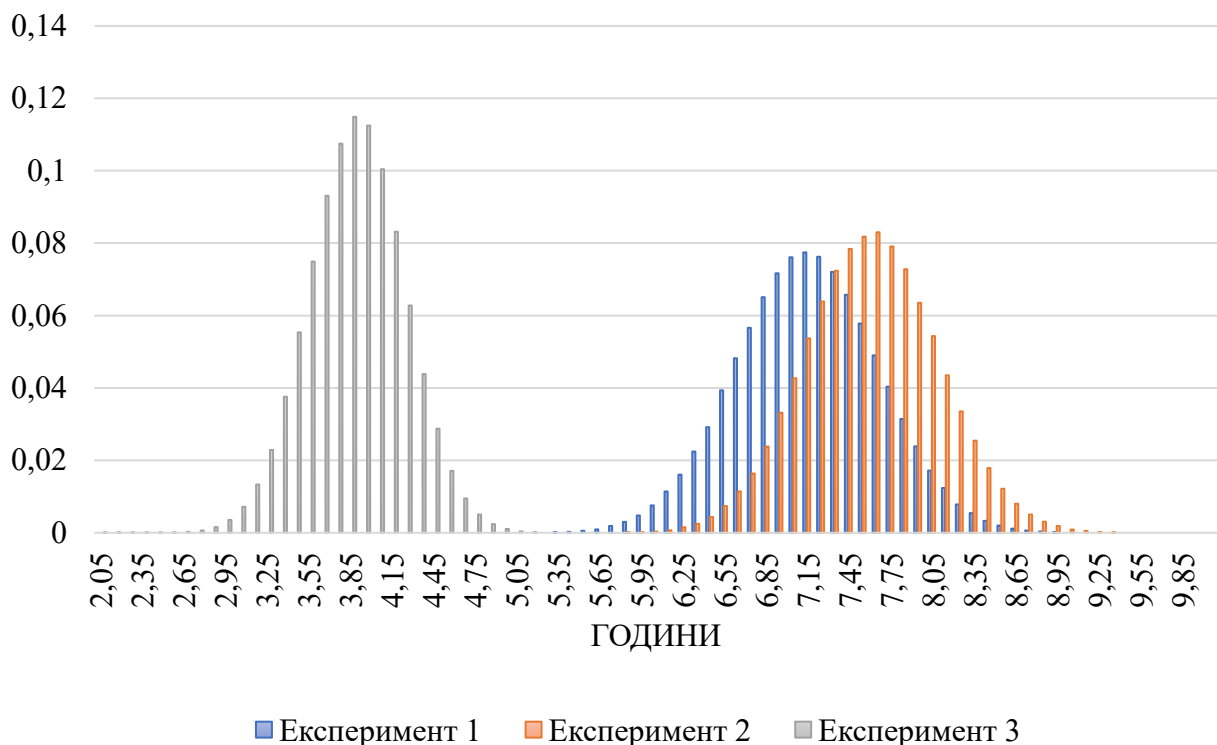


Рисунок 4.3 – Щільність імовірності розподілу часу очікування автомобілями вантажу

Таблиця 4.8 – Показники щільності розподілу часу очікування автомобілями вантажу

Експеримент оптимізації	Обсяг вибірки, одиниць	Значення показника, годин			Стандартне відхилення	Коеф. варіації
		Min	M(x)	Max		
Експеримент 1	243419	2,1	7,2	16,9	0,5	0,073
Експеримент 2	275555	1,8	7,6	17,6	0,5	0,064
Експеримент 3	413317	1,2	3,9	12,8	0,4	0,092

Водночас, для першого та другого експериментів математичні сподівання є значно більшими, ніж для третього експерименту. Такий результат пояснюється меншим рівнем завантаження парку транспортних засобів у випадку із першим та другим експериментом, ніж для результатів третього експерименту (таблиця 4.5).

Щільність розподілу часу очікування залізничними відправницькими маршрутами вантажу для перевезення також має симетричну природу та низьку варіацію показника, меншу за 6% (рисунок 4.4, таблиця 4.9). Аналогічно із даними для автомобільної транспортної системи, середнє значення часу очікування вантажу суттєво залежить від середнього рівня використання парку залізничних транспортних засобів (таблиця 4.5). Так, для даних експерименту два з найменшим рівнем завантаження парку залізничних транспортних засобів (0,54), середній час очікування є найбільшим (77,7 год.).

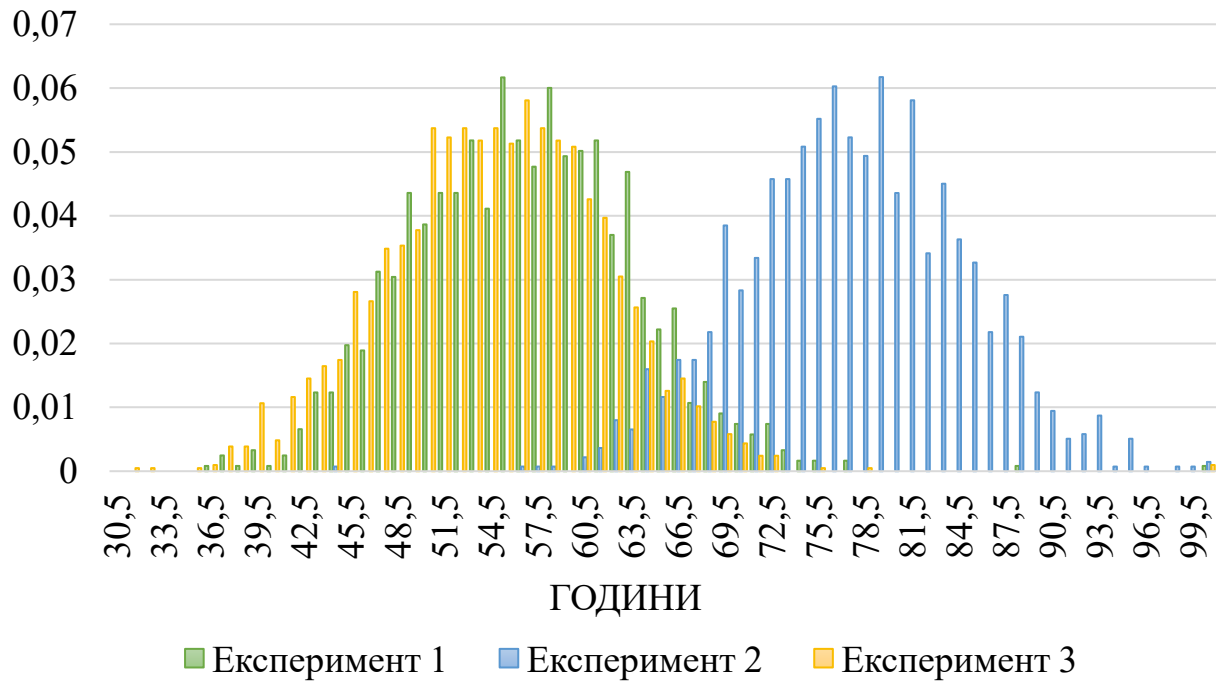


Рисунок 4.4 – Щільність імовірності розподілу часу очікування залізничними відправницькими маршрутами вантажу

Таблиця 4.9 – Показники щільності розподілу часу очікування залізничними відправницькими маршрутами вантажу

Експеримент оптимізації	Обсяг вибірки, одиниць	Значення показника, годин			Стандартне відхилення	Коеф. варіації
		Min	M(x)	Max		
Експеримент 1	1216	36,7	56,693	128,0	7,3	0,057
Експеримент 2	1377	44,5	77,766	149,3	7,4	0,049
Експеримент 3	2066	31,0	54,637	125,4	7,1	0,057

Щільність розподілу часу обороту вантажного автомобіля має достатньо велику симетрію з чітко вираженим лівобічним відхиленням (рисунок 4.5). Зазначений результат для всіх трьох експериментів пояснюється розгалуженістю маршрутів обертання вантажних автомобілів. Серед всієї множини можливих маршрутів (таблиця 4.3) приблизно половина має вдвічі меншу протяжність, ніж інша половина. Отже, зазначена лівобічна асиметрія пояснюється фізичними характеристиками мережі постачання автомобільної транспортної системи.

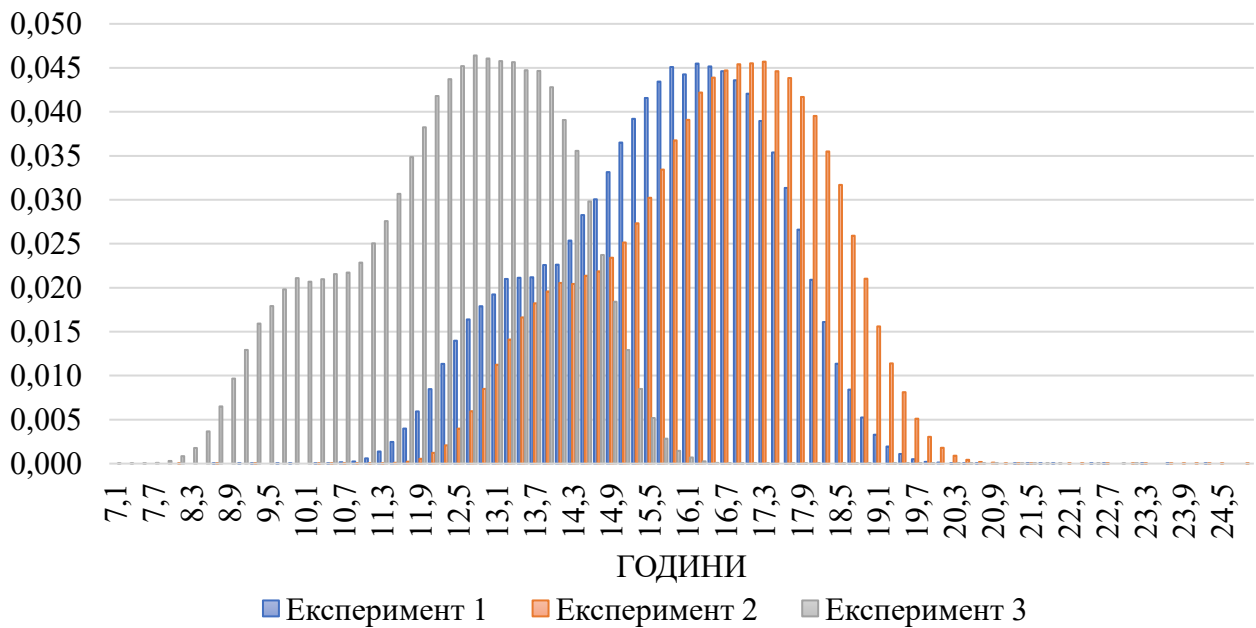


Рисунок 4.5 – Щільність імовірності розподілу часу обороту вантажного автомобіля

Середнє значення показника є найменшим для умов третього експерименту (таблиця 4.10), що, знову ж таки, пояснюється найбільшим рівнем використання автомобільних транспортних засобів та, відповідно, найменшим часом очікування вантажу (таблиця 4.8). У всіх трьох експериментах коефіцієнт варіації не перевищував 15% що свідчить про достатню сталість процесу транспортування.

Таблиця 4.10 Параметри щільності розподілу часу обороту вантажного автомобіля

Експеримент оптимізації	Обсяг вибірки, одиниць	Значення показника, годин			Стандартне відхилення	Коеф. варіації
		Min	M(x)	Max		
Експеримент 1	243207	8,7	15,7	26,9	1,7	0,109
Експеримент 2	275336	8,0	16,5	28,9	1,7	0,103
Експеримент 3	412906	6,0	12,4	23,1	1,7	0,134

Для залізничної транспортної системи щільність часу обороту відправницького маршруту має більшу симетрію (рисунок 4.6), що пояснюється рухом залізничного маршруту тільки на одному залізничному напрямку. Середнє

значення часу обороту є найбільшим для умов другого експерименту що пояснюється найнижчим рівнем завантаження парку залізничних маршрутів відповідно до умов другого експерименту (таблиця 4.5) та, відповідно, найбільшим часом очікування вантажу для відправлення (таблиця 4.9).

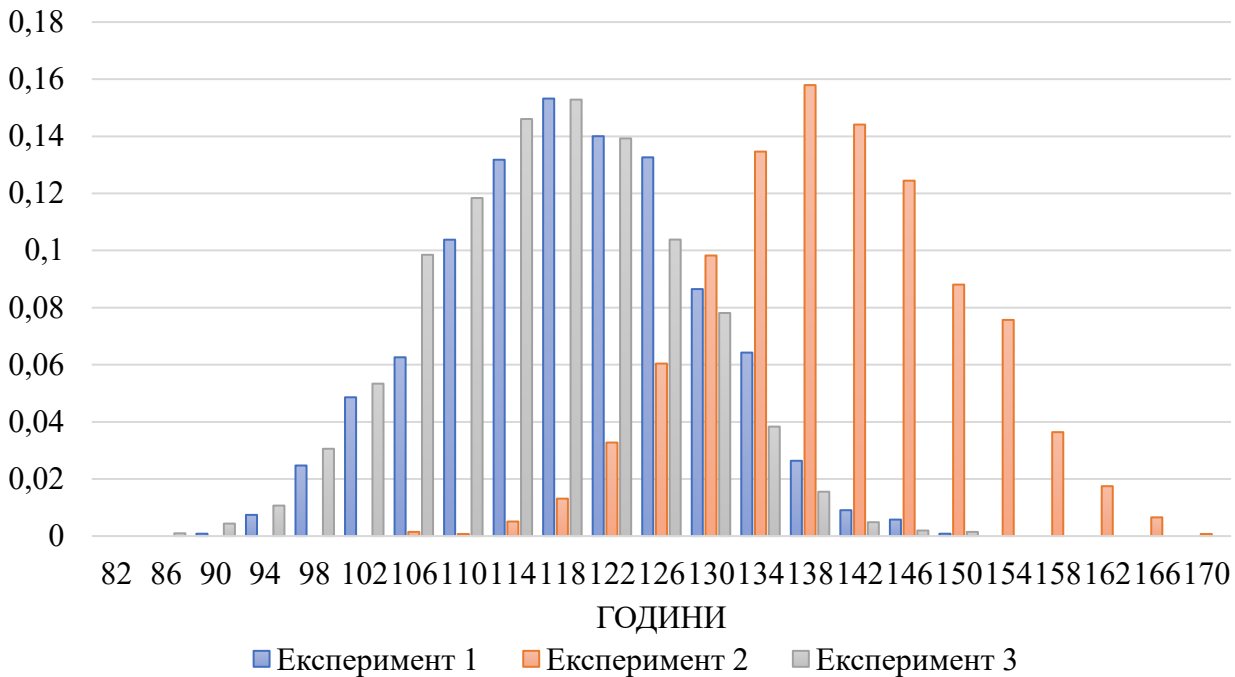


Рисунок 4.6 – Щільність імовірності розподілу часу обороту відправницького маршруту

Водночас, варіація показника є несуттєвою і не перевищує 9% (таблиця 4.10), що також свідчить про сталість в технології організації залізничних вантажних перевезень.

Таблиця 4.10 – Параметри щільності розподілу часу обороту відправницького маршруту

Експеримент оптимізації	Обсяг вибірки, одиниць	Значення показника, годин			Стандартне відхилення	Коеф. варіації
		Min	M(x)	Max		
Експеримент 1	1214	88,7	119,1	205,5	10,5	0,088
Експеримент 2	1374	106,2	140,2	219,8	10,4	0,074
Експеримент 3	2061	84,6	116,9	192,3	10,2	0,087

Щільність імовірності розподілу часу доставки вантажів сушею, тобто автомобільним та залізничним транспортом до морського торговельного порту зазначена на рисунку 4.7 та у таблиці 4.11. Незалежно від порядкового номеру експериментів, коефіцієнт варіації показника наближений за значенням до коефіцієнтів варіації аналогічних розподілів часу перебування вантажу окремо у автомобільній та залізничній системі, що свідчить про близький характер варіації (рисунок 4.7, таблиця 4.11).

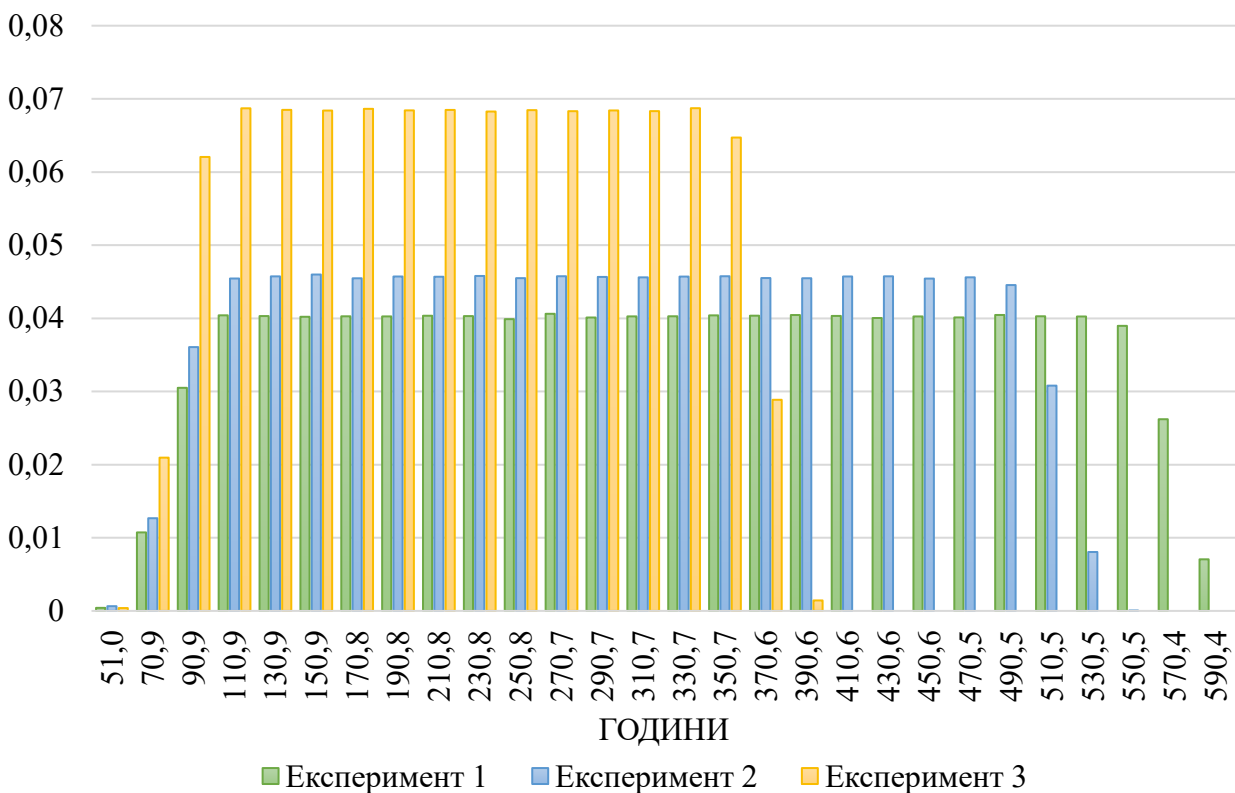


Рисунок 4.7 – Щільність імовірності розподілу часу доставки вантажу по суші (до моменту завантаження у судно)

Таблиця 4.11 – Параметри щільності розподілу часу доставки вантажу автомобільним та залізничним транспортом (до моменту завантаження у судно)

Експеримент оптимізації	Обсяг вибірки, одиниць	Значення показника, годин			Стандартне відхилення	Коеф. варіації
		Min	M(x)	Max		
Експеримент 1	242500	51,5	328,3	600,1	143,7	0,438
Експеримент 2	275000	53,9	298,1	542,2	126,9	0,426
Експеримент 3	412500	55,9	222,4	395,4	84,8	0,381

Щільність розподілу часу накопичення вантажу до норми завантаження у залізничний відправницький маршрут має симетричну природу із рівномірним розподілом на значному часовому інтервалі для всіх варіантів проведених експериментів, про що свідчить значна варіація близько 0,6 (рисунок 4.8, таблиця 4.12). Середній час накопичення є більшим для результатів першого та другого експериментів, що прямопропорційно корелює з річними обсягами відправлення вантажів.

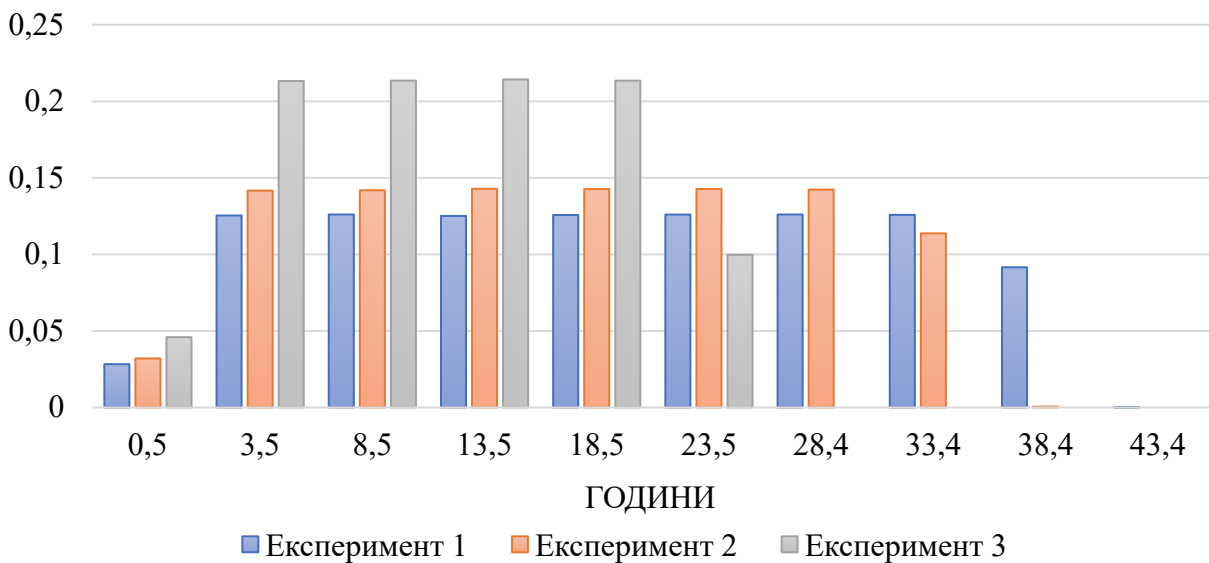


Рисунок 4.8 – Щільність імовірності розподілу часу накопичення вантажу для норми завантаження у залізничний маршрут

Таблиця 4.12 – Показники щільності розподілу часу накопичення вантажу для норми завантаження у залізничний маршрут

Експеримент оптимізації	Обсяг вибірки, одиниць	Значення показника, годин			Стандартне відхилення	Коеф. варіації
		Min	M(x)	Max		
Експеримент 1	243000	0,0	19,7	41,5	11,5	0,581
Експеримент 2	275600	0,0	17,4	37,0	10,1	0,580
Експеримент 3	413200	0,0	11,6	24,9	6,8	0,581

Щільність розподілу часу накопичення вантажу до норми завантаження у судно має складну та близьку до рівномірної природу, про що свідчить велике значення коефіцієнта варіації – більше за 0,6 (рисунок 4.9, таблиця 4.13). Двозначний результат можна пояснити тільки тим, що вантажомісткість судна тобто комерційний дедвейт є достатньо великим відносно добової інтенсивності вантажопотоків, встановлених за умовами експериментів

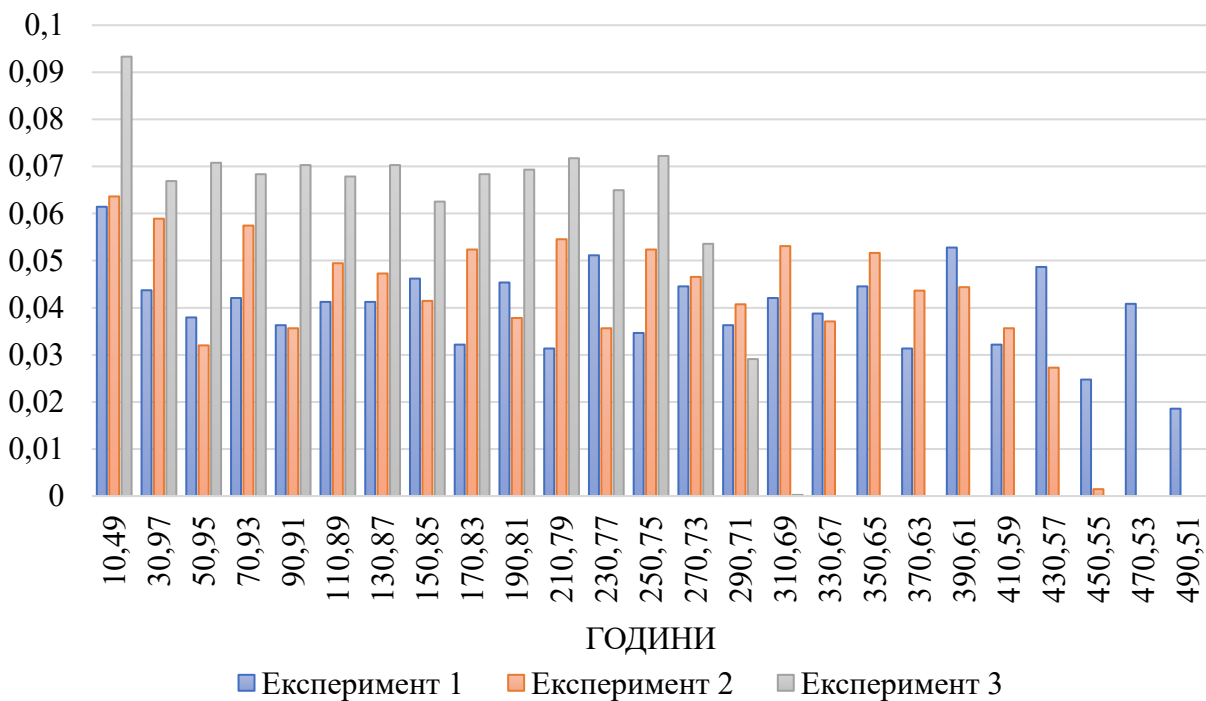


Рисунок 4.9 – Щільність імовірності розподілу часу накопичення вантажу для норми завантаження у морське судно

Таблиця 4.13 – Показники щільності розподілу часу накопичення вантажу для норми завантаження у морське судно

Експеримент оптимізації	Обсяг вибірки, одиниць	Значення показника, годин			Стандартне відхилення	Коеф. варіації
		Min	M(x)	Max		
Експеримент 1	242500	0,0	237,9	498,2	143,8	0,604
Експеримент 2	275000	0,0	209,7	443,0	126,9	0,605
Експеримент 3	412500	0,0	139,8	300,8	85,1	0,608

## 4.2 Дослідження закономірностей впливу вихідних параметрів системи на її продуктивність та показники ефективності

Технологічна лінія з постачання зернових є багатоелементною та складною транспортно-технологічною системою. Ефективність функціонування такої системи залежить від ефективності планування структури та організації всіх елементів окремо підсистем та системи в цілому.

Задля визначення закономірностей впливу різних елементів та підсистем на загальну ефективність транспортно-технологічної лінії було проведено низку експериментів.

Експерименти проводились із розробленою раніше в третьому розділі цієї дисертаційної роботи імітаційною моделлю та відповідно до трьох сценаріїв планування перевізної роботи, зазначеної у пункті 4.1, таблиці 4.1-4.5.

Відповідно до особливостей розробленої імітаційної моделі, процес транспортування зернових починається з автомобільної транспортно-технологічної системи, яка забезпечує первинне збирання зернових із пунктів виготовлення та дистрибуції дрібних партій вантажів до залізничної станції завантаження і формування зернових маршрутів. Другим етапом є організація зернових залізничних маршрутів, які прямують від станції завантаження, тобто взаємодії із автомобільним транспортом, до морського торговельного терміналу, тобто пунктів взаємодії із морським транспортом. Саме тому логічним є первинне дослідження впливу ефективності самої автомобільної транспортної системи на весь ланцюг постачання.

Серія експериментів стосувалась визначення впливу парку вантажних автомобілів на ефективність функціонування автомобільної транспортно-технологічної системи та всієї системи постачання зернових, передбаченої імітаційною моделлю. Розрахункові показники на рисунках 4.10-4.12 обмежені значенням 70 годин.

Перший експеримент реалізовано для фактичного обсягу перевезення зернових за даними 2021 року, а саме 883,5 тисяч тонн. При розрахунковому

оптимальному значенні робочого парку вантажних автомобілів 89 одиниць та робочого парку залізничних маршрутів три одиниці (рисунок 4.10).

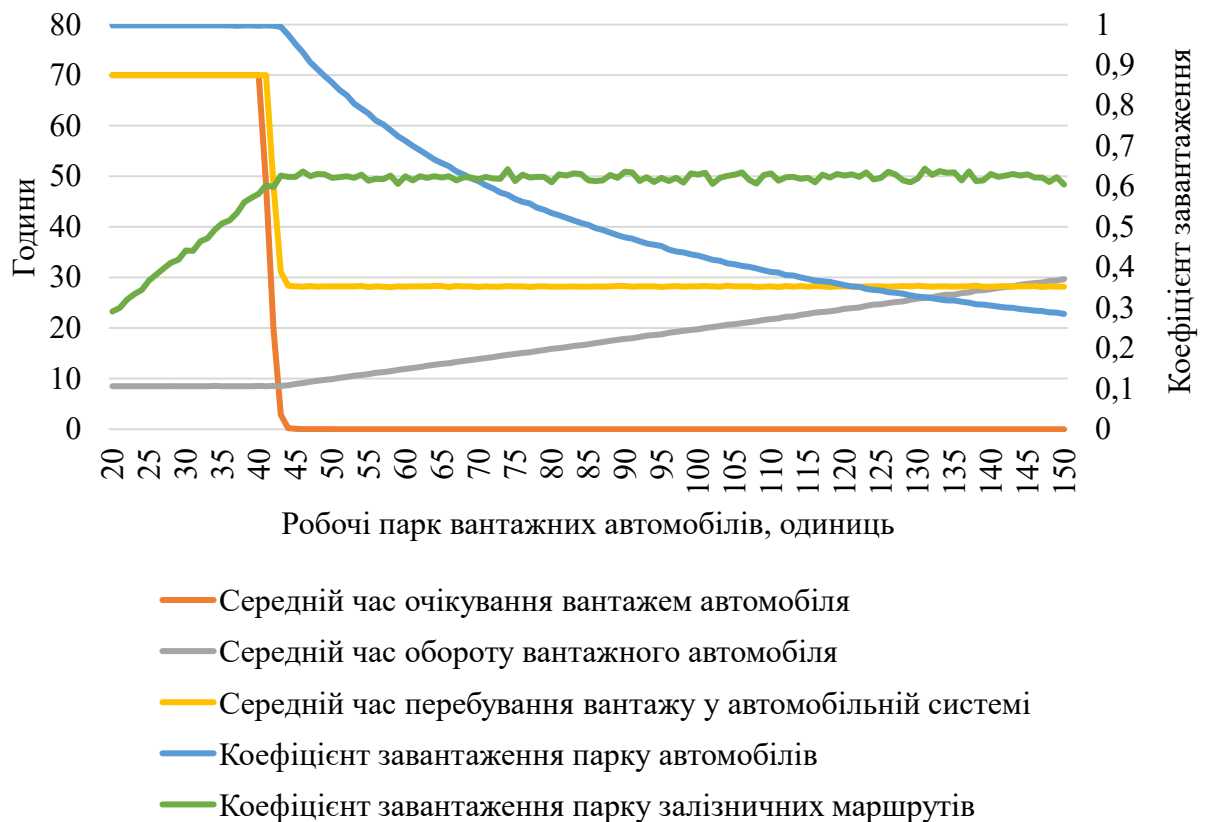


Рисунок 4.10 – Залежність основних показників функціонування автомобільної транспортно-технологічної лінії від робочого парку вантажних автомобілів при річному обсязі перевезення 883,5 тонн (данні 2021 року)

При значенні близько 44 автомобілі та менше спостерігається вкрай нестабільне функціонування автомобільної транспортної системи, про що свідчить розрахунковий коефіцієнт завантаження парку автомобілів (близько 100%) та критично великий (більше 70 годин) час очікування вантажем автомобіля. Однак середній коефіцієнт завантаження парку залізничних маршрутів є меншим за оптимальний рівень, що свідчить про недозавантаженість залізничної транспортної системи через відмови в роботі автомобільної транспортної системи.

Для умови експерименту 2 із прогнозованим обсягом перевезення 1 млн тонн зернових на рік та оптимальними парками транспортних засобів 92 та 4 одиниці відповідно для автомобільної та залізничної транспортних систем спостерігається

схожа ситуація. Однак критичним тут виступає розмір парку автомобілів приблизно у 49 та менше одиниць (рисунок 4.11). Також спостерігається критичний рівень завантаження парку автомобілів та недозавантаженість залізничної транспортної системи.

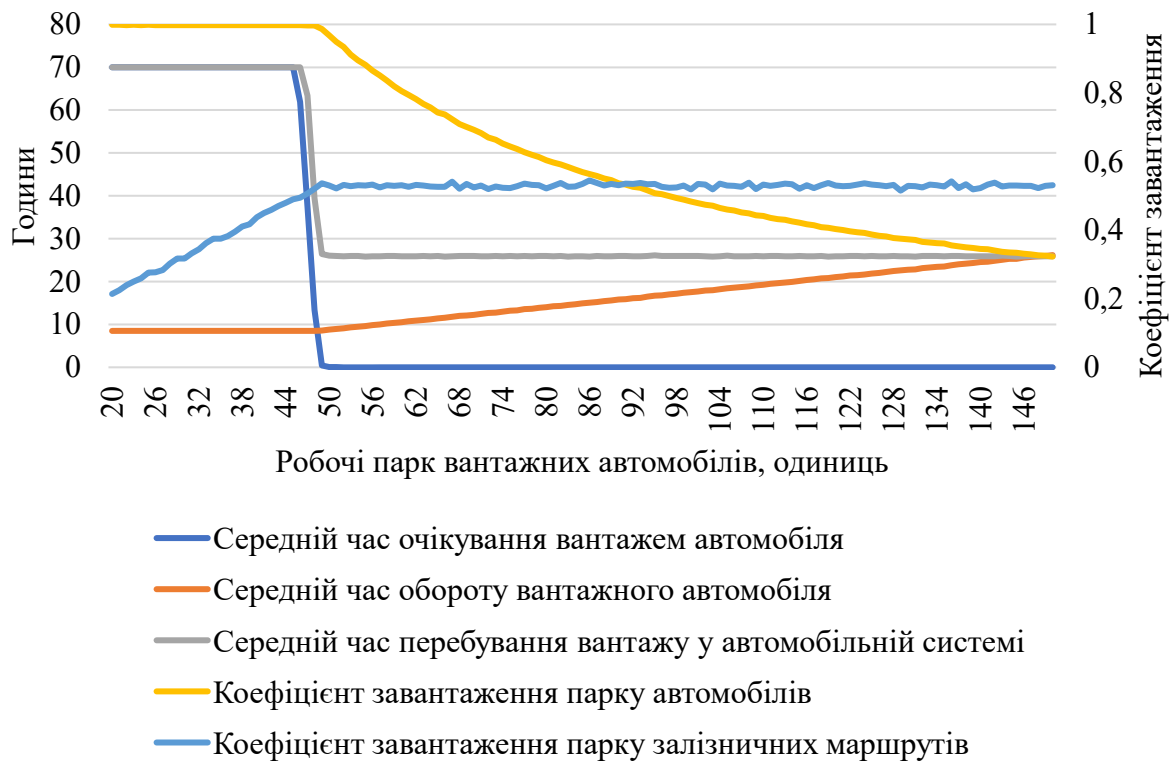


Рисунок 4.11 – Залежність основних показників функціонування автомобільної транспортно-технологічної лінії від робочого парку вантажних автомобілів при прогнозованому річному обсязі перевезення 1 млн. тонн

Для умов третього експерименту із прогнозованим обсягом перевезення 1,5 млн. тонн на рік зернових та відповідно оптимальними робочими парками автомобілів у 106 одиниць та залізничних маршрутів п'ять одиниць критичним розміром парку вантажного автомобіля є значення 73 автомобілі (рисунок 4.12).

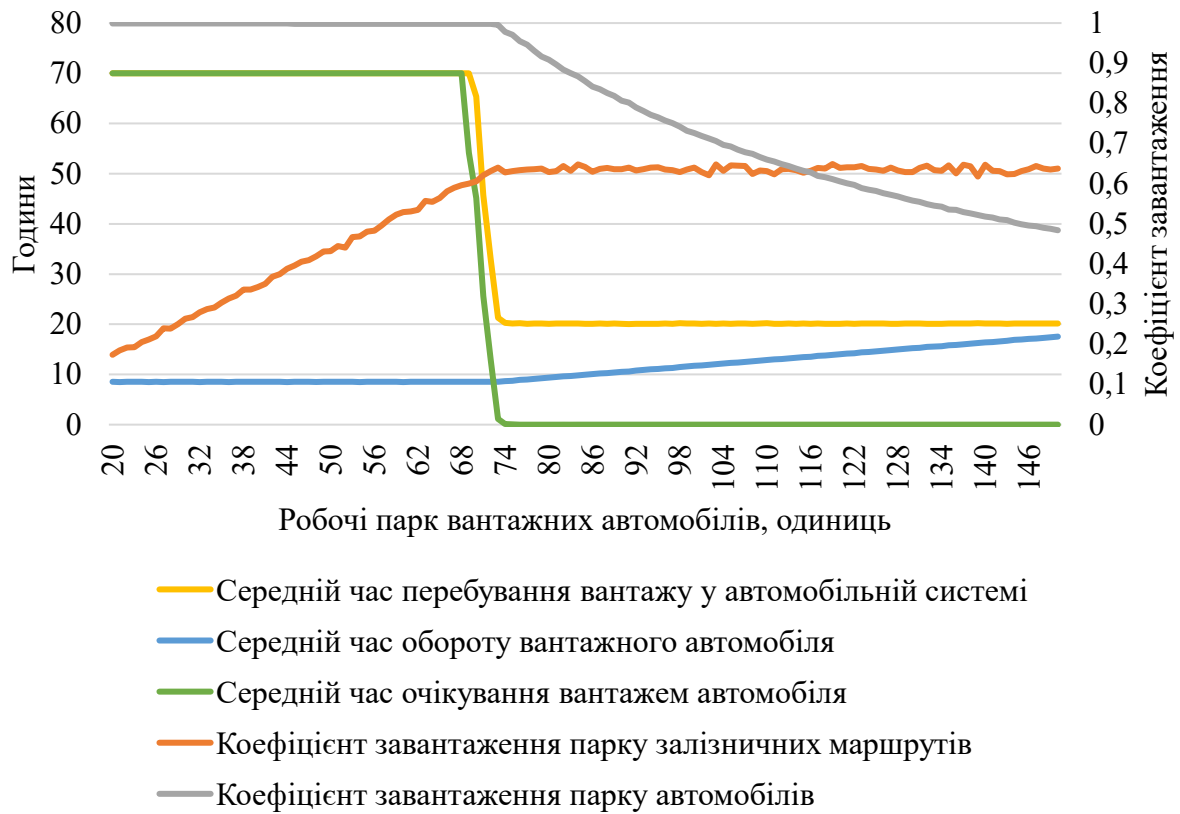


Рисунок 4.12 – Залежність основних показників функціонування автомобільної транспортно-технологічної лінії від робочого парку вантажних автомобілів при прогнозованому річному обсязі перевезення 1,5 млн. тонн

При співставленні розрахункових значень середнього часу доставки вантажів сушею (до моменту завантаження вантажу в морських судах) в залежності від розрахункового робочого парку вантажних автомобілів спостерігається суттєве збільшення цього показника при зменшенні робочого парку автомобілів нижче встановлених критичних значень. Водночас спостерігається тенденція до зменшення загального часу доставки вантажу залежно від обсягу вантажних перевезень, що пояснюється більшою інтенсивністю надходження вантажів до пунктів відправлення, а отже, меншим часом накопичення вантажу до норми завантаження у транспортний засіб (рисунок 4.13).

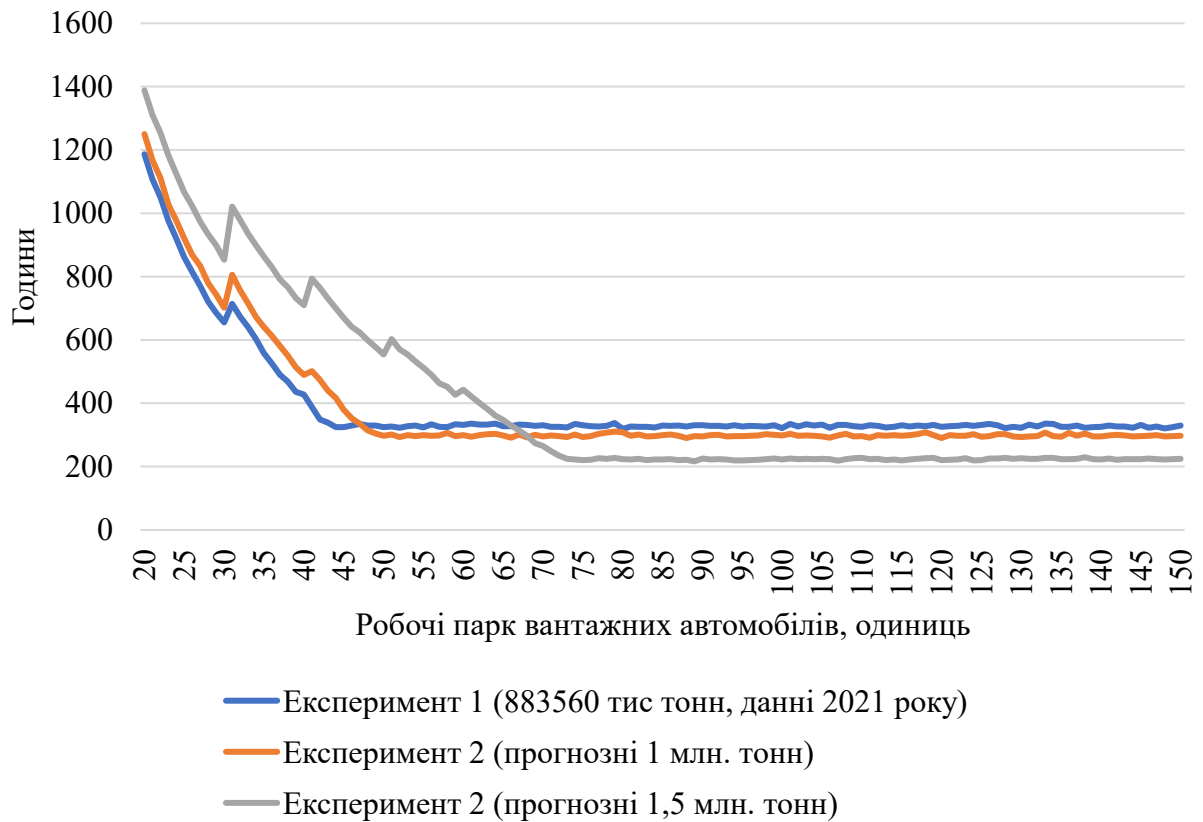


Рисунок 4.13 – Залежність середнього часу доставки вантажів по суцці від робочого парку вантажних автомобілів при різних планових обсягах перевезень

Інша серія експериментів була спрямована на встановлення закономірностей впливу розрахункового парку залізничних маршрутів на ефективність функціонування залізничної транспортної системи в складі ланцюга постачання зернових. Серія експериментів також складалась з трьох етапів – для фактичних за 2021 рік обсягів перевезення у 883,5 тис. тонн та прогнозованих: один та півтора мільйона тонн на рік. Всі розрахунків показники обмежені значенням 500 годин.

Перший експеримент для обсягів перевезення 2021 року у 883,5 тонн на рік також встановив критичний рівень завантаження транспортної системи при недостатній кількості парку залізничних маршрутів, та майже незмінних показниках при надлишковому робочому парку залізничного рухомого складу (рисунок 4.14).

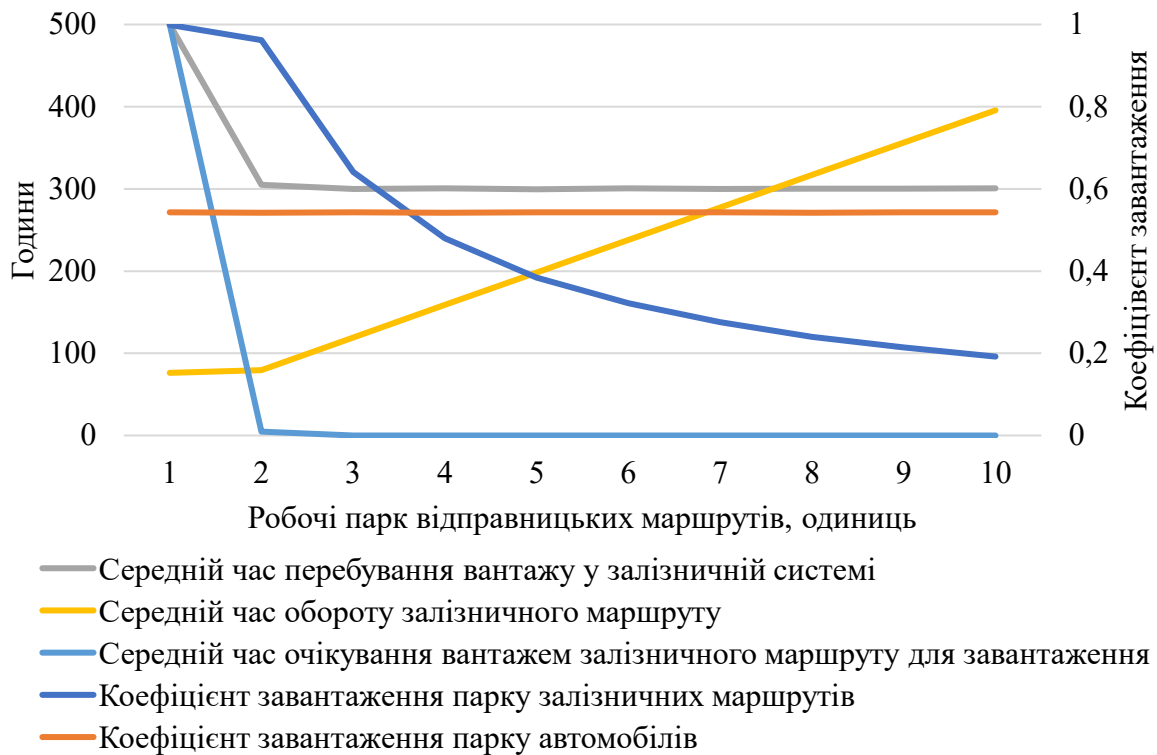


Рисунок 4.14 – Залежність основних показників функціонування залізничної транспортно-технологічної лінії від робочого парку відправницьких маршрутів при річному обсязі перевезення 883560 тонн (данні 2021 року)

При значенні парку залізничних маршрутів менше двох спостерігається значне зростання часу очікування вантажем рухомого складу для відправлення та коефіцієнту завантаження парку залізничних маршрутів. Водночас коефіцієнт завантаження парку вантажних автомобілів є незмінним і не залежить від наявного парку залізничних маршрутів. Цей результат пояснюється тим, що хронологічно процес перевезення вантажів у ланцюзі постачання починається з автомобільної транспортної системи, тому діяльність залізничної транспортної системи ніяк не впливає на ефективність функціонування автомобільної транспортної системи.

Для другого експерименту при обсягах перевезення 1 млн т на рік та третього експерименту в 1,5 млн т на рік спостерігаються схожі тенденції. При несуттєвому зменшенні робочого парку залізничних маршрутів система починає функціонувати вкрай нестабільно та неефективно, що ніяк не впливає на автомобільну транспортно-технологічну систему (рисунки 4.15, 4.16).

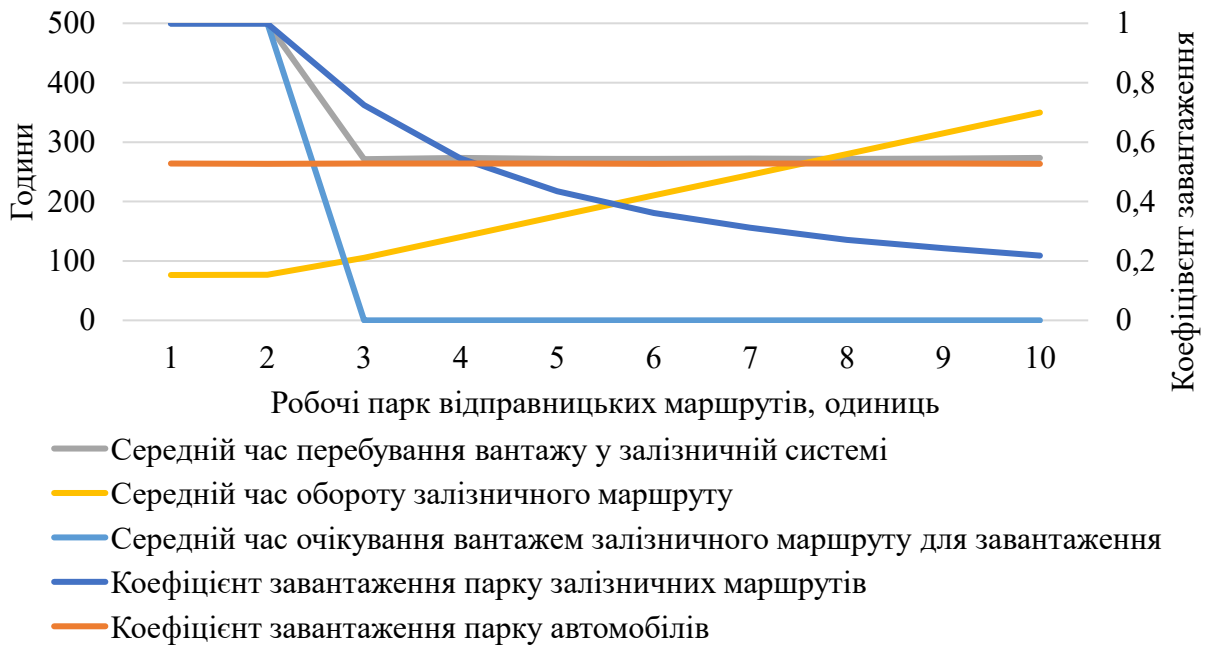


Рисунок 4.15 – Залежність основних показників функціонування залізничної транспортно-технологічної лінії від робочого парку відправницьких маршрутів при прогнозованому річному обсязі перевезення 1 млн. тонн



Рисунок 4.16 – Залежність основних показників функціонування залізничної транспортно-технологічної лінії від робочого парку відправницьких маршрутів при прогнозованому річному обсязі перевезення 1,5 млн. тонн

Аналогічно із серію експериментів для автомобільної транспортної системи, спостерігається закономірність щодо зниження загального часу доставки вантажу сушею залежно від річних планових обсягів для перевезення вантажу. Залежність між значенням середнього часу доставки вантажу відносно робочого парку відправницьких маршрутів також демонструє суттєве зростання при несуттєвому зменшенні парку транспортних засобів і майже не залежить від збільшення робочого парку транспортних засобів. Водночас, при збільшенні робочого парку залізничних маршрутів спостерігається зростання тривалості обороту залізничного рухомого складу незалежно від обсягів перевезення вантажів (рисунок 4.14 – 4.17).

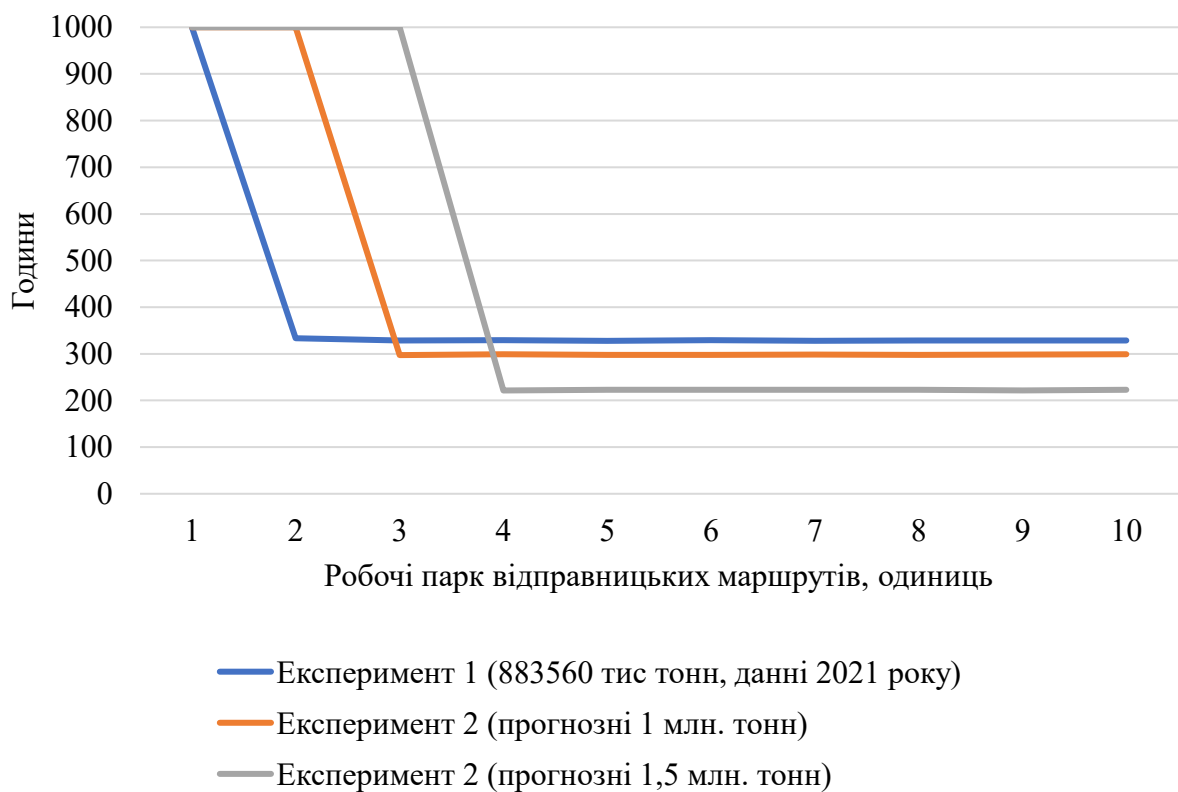


Рисунок 4.17 – Залежність середнього часу доставки вантажів по суші від робочого парку залізничних маршрутів при різних планових обсягах перевезень (обмежено значенням 1000 год.).

4.3 Оцінка обсягів затримки вантажів унаслідок критичного зниження робочого парку транспортних засобів транспортно-технологічної лінії постачання зернових у змішаному автомобільно-залізнично-водному сполученні

Одним із ключових завдань процесу транспортної логістики та організації перевезення вантажів, у тому числі у змішаному сполученні, є визначення оптимальних параметрів процесу де критерієм оптимізації можуть виступати такі показники:

- середній час доставки одиниці вантажу;
- оптимальне використання (завантаження) парку транспортних засобів та інфраструктурних об'єктів транспортних систем;
- забезпечення необхідного рівня відмовостійкості технологічного процесу;
- сукупні техніко-експлуатаційні витрати перевізного процесу;
- середня собівартість виготовлення одиниці транспортної продукції: тонно-км, пасажиро-км [114].

Водночас, одним із можливих критеріїв оптимізації може виступати обсяг вантажу, що формується в процесі транспортування та чекає свого відправлення через недостатньо ефективне використання транспортних засобів.

Наприклад, при недостатній кількості транспортних засобів збільшується тривалість чекання вантажів до відправлення [119]. Особливо таке явище притаманне організації перевезень у змішаному сполученні, коли кожна партія вантажу перевантажується з одного транспорту на інший [102, 120-121].

У таких випадках зазвичай використовують проміжні логістичні термінали, основним призначенням яких є тимчасове зберігання вантажу. Середня тривалість знаходження вантажу залежить від технологічних особливостей ланцюга постачання та ефективності в організації обороту транспортних засобів.

Такий вантаж, по суті, являє собою «заморожені активи підприємств» і призводить до затримок обороту коштів і прямих збитків клієнтів. Тому на базі розробленої у третьому розділі цієї дисертаційної роботи імітаційної моделі були проведені дослідження умов формування вантажної маси та залежності обсягу цієї

маси від ефективності експлуатації парку транспортних засобів. При моделюванні процесів під час експерименту було задано один рік модельного часу, що дозволило встановити обсяг вантажу, який буде сформовано через рік експлуатації транспортної системи.

Експерименти проводились для трьох випадків, що зазначені в таблиці 4.5. Перша серія експериментів проводилась для параметрів автомобільної транспортної системи (таблиця 4.14). Оцінка формування вантажної маси перед відправленням автомобільним транспортом проводилось для оптимального розміру парку (відповідно до умов обмежень (3.7) до моделі (3.6)), критично низького розміру парку та гранично допустимого розміру парку.

Під критично низьким розміром парку мається на увазі розрахункова кількість транспортних засобів середній рівень використання яких наближений до верхньої межі оптимальності 0,75 (відповідно до (3.7)).

Під гранично допустимим розміром парку транспортних засобів мається на увазі розрахункова кількість автомобілів, нижче якої спостерігалось різке збільшення середнього часу очікування вантажем вантажного автомобілю (рисунки 4.10-4.12).

Таблиця 4.14 – Співвідношення оптимального та критичного розміру парку вантажних автомобілів

Експеримент оптимізації	Загальний вантажопотік, тонн / рік	Оптимальний розмір парку			Критично низький розмір парку			Гранично допустимий розмір парку		
		Розмір, одиниць	Розрахункове завантаження парку	Розрахункове значення цільової функції (3.6), годин	Розмір, одиниць	Розрахункове завантаження парку	Розрахункове значення цільової функції (3.6), годин.	Розмір, одиниць	Розрахункове завантаження парку	Розрахункове значення цільової функції (3.6), годин
Експеримент 1	883560	79	0,54	322,6	58	0,739	324,9	44	0,975	324,4
Експеримент 2	1000000	92	0,52	292,8	65	0,743	298,3	49	0,987	304,9
Експеримент 3	1500000	106	0,68	217,8	98	0,742	223,4	74	0,978	222,8

Під час моделювання встановлено, що при зменшенні розрахункової кількості вантажних автомобілів нижче гранично допустимого розміру парку спостерігається стрімке збільшення обсягу вантажів, що чекають відправки (рисунок 4.18).

Крім того, залежність між середнім часом доставки вантажів сушею та обсягом формування вантажної маси перед завантаженням у вантажні автомобілі має чітко виражену логарифмічну залежність для всіх трьох експериментів. Щільність апроксимації визначалась коефіцієнтом детермінації, який становить більше ніж 0,97, що вказує на дуже щільну апроксимацію теоретичними моделями експериментальних даних (рисунок 4.19).

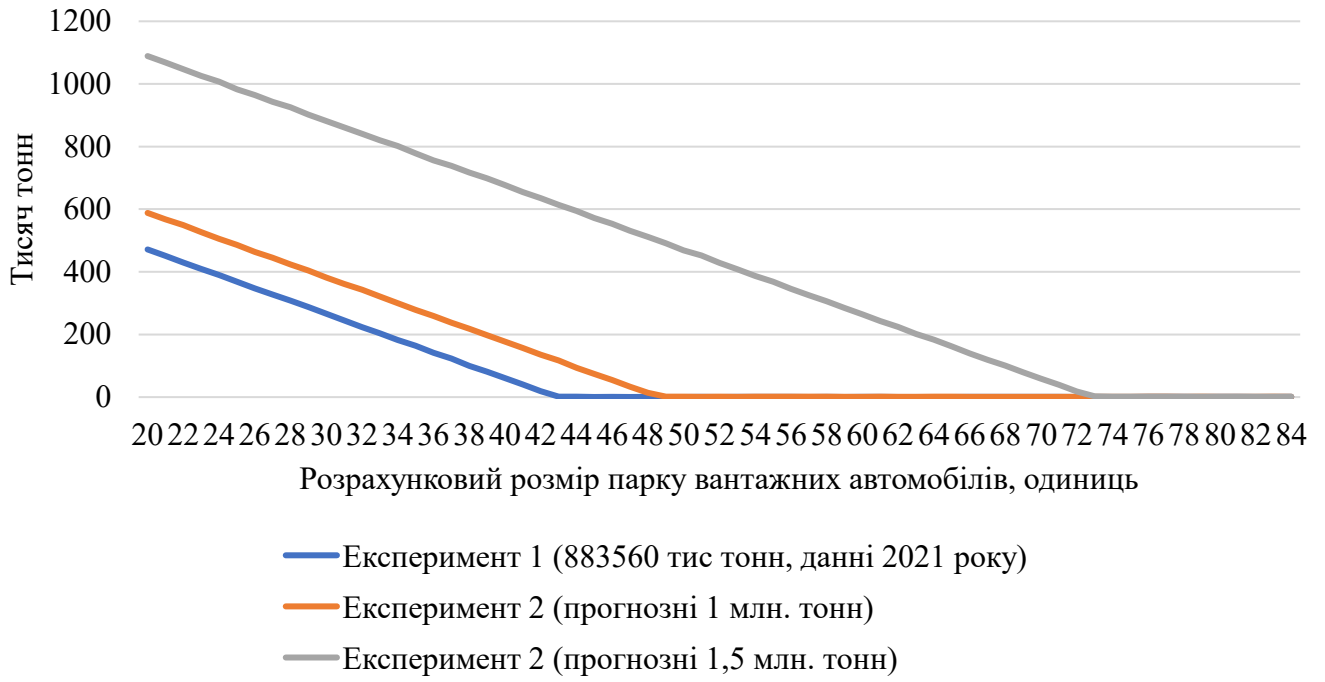


Рисунок 4.18 – Обсяг формування вантажної маси залежно від розрахункового парку вантажних автомобілів на кінець одного року моделювання

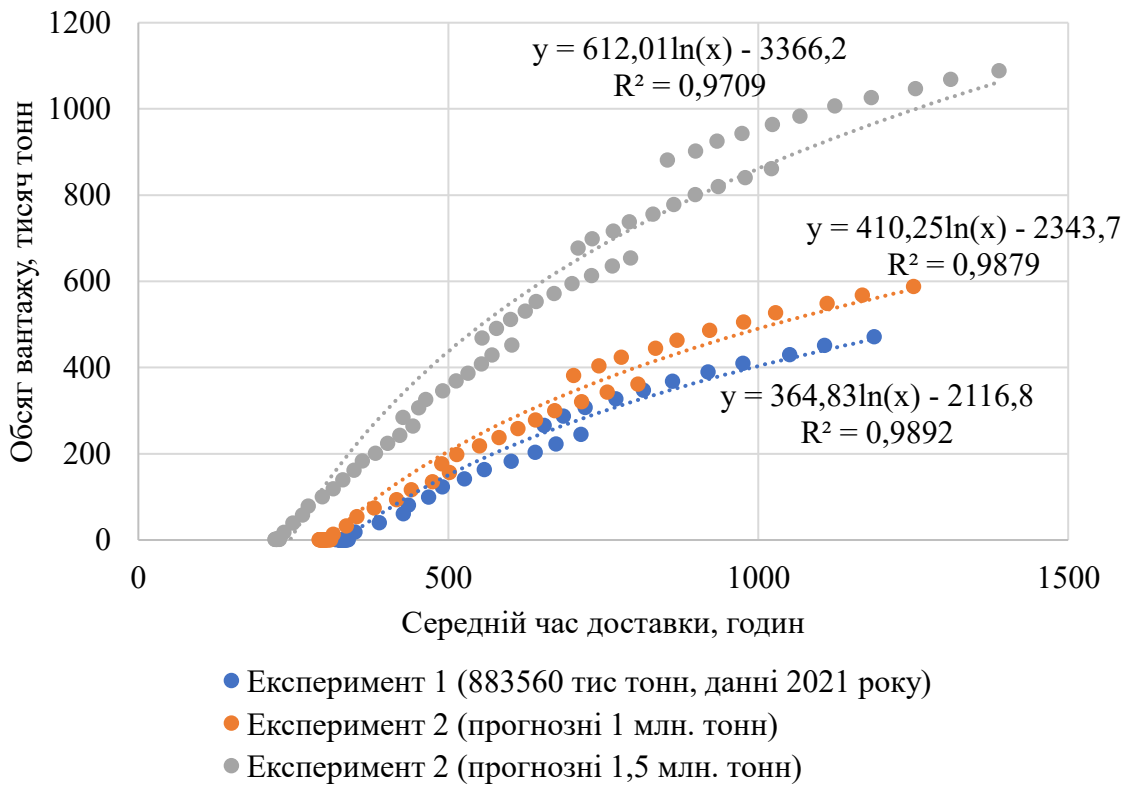


Рисунок 4.19 – Експериментальні та теоретичні залежності між середнім часом доставки вантажу по суші та обсягу формування вантажної маси перед завантаженням у автомобілі

Аналогічна серія експериментів проводилась для залізничної транспортної системи. Також були встановлені оптимальний, критично-низький та гранично допустимий розміри парку залізничних відправницьких маршрутів (рисунки 4.20-4.23, таблиця 4.15). Для першого експерименту низький та гранично допустимий розмір парку є однаковими.

Таблиця 4.15 – Співвідношення оптимального та критичного розміру парку залізничних відправницьких маршрутів

Експеримент оптимізації	Загальний вантажопотік, тонн / рік	Оптимальний розмір парку			Критично низький розмір парку			Гранично допустимий розмір парку		
		Кількість, одиниць	Розрахункове завантаження парку	Розрахункове значення цільової функції (3.6), годин.	Кількість, одиниць	Розрахункове завантаження парку	Розрахункове значення цільової функції (3.6), годин.	Кількість, одиниць	Розрахункове завантаження парку	Розрахункове значення цільової функції (3.6), годин.
Експеримент 1	883560	3	0,63	322,63	-			2	0,962	333,2
Експеримент 2	1000000	4	0,54	292,82	3	0,725	297,2	2	0,999	2377,4
Експеримент 3	1500000	5	0,64	217,82	4	0,819	221,4	3	0,999	2238,5

Аналогічно із результатами попередньої серії експериментів, для залізничної транспортної системи також спостерігається різке збільшення вантажної маси, що чекає завантаження в залізничні маршрути при зменшенні кількості складів відправницьких маршрутів нижче гранично допустимого рівня (рисунок 4.20).

Однак на відміну від автомобільної транспортної системи для залізничної транспортної системи спостерігається щільна лінійна залежність між обсягами вантажної маси, що чекає завантаження у залізничній рухомий склад, та середнім

часом доставлення вантажу сушею. Коефіцієнт детермінації для всіх трьох залежностей наближений до значення 1,0 (рисунок 4.21).

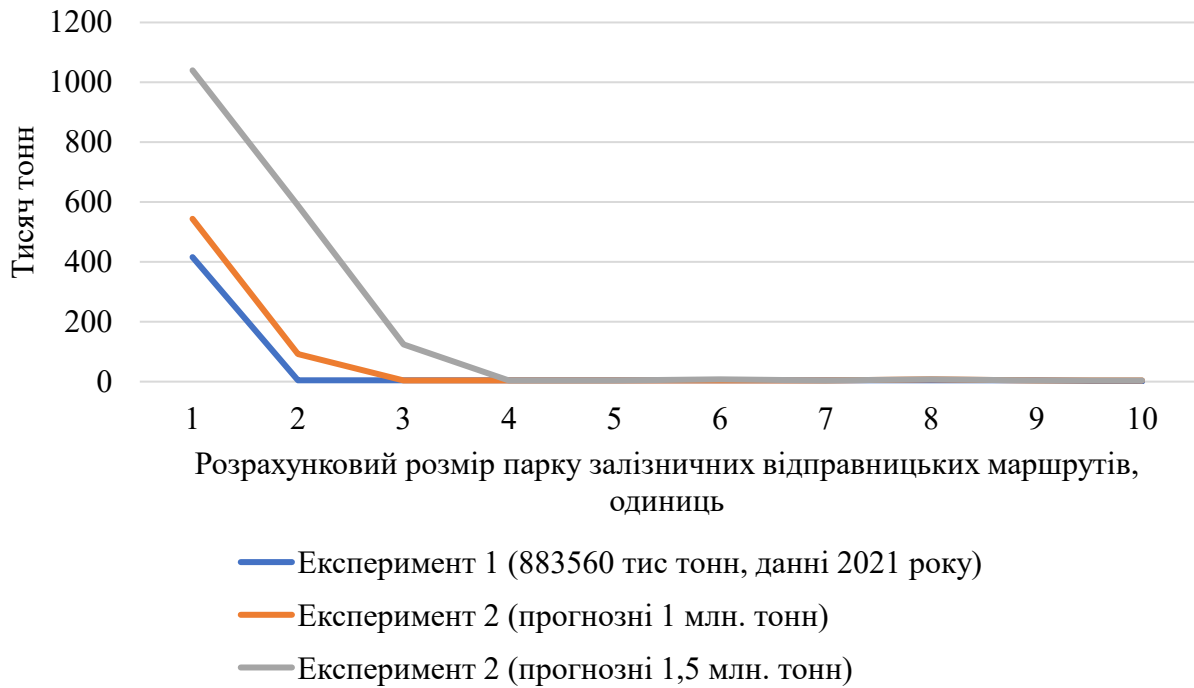


Рисунок 4.20 – Обсяг формування вантажної маси (обмежено значенням 1000 тонн) залежно від розрахункового парку залізничних відправницьких маршрутів на кінець одного року моделювання

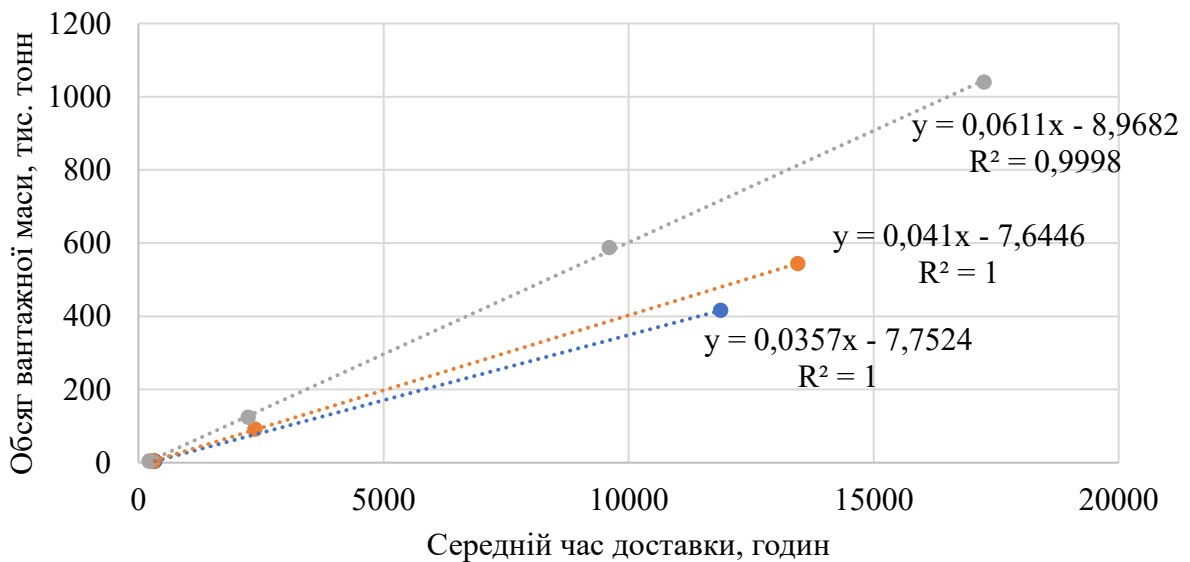


Рисунок 4.21 – Експериментальні та теоретичні залежності між середнім часом доставки вантажу по суші та обсягу формування вантажної маси перед завантаженням залізничні відправницькі маршрути

Надлишковий обсяг вантажу ( $\Delta P_{S_{\text{надл}}}$ ), що формується при очікуванні транспортних засобів через недостатній розмір робочого парку або затримки в обороті через технологічні та інші відмови, можна розрахувати як:

$$\Delta P_{S_{\text{надл}}} = P_S - \overline{P_{S_{\text{оптим.технл.}}}} \quad (4.1)$$

де  $P_S$  – загальний обсяг вантажу на кінець прийнятого періоду експлуатації або моделювання транспортного процесу, тонн;

$\overline{P_{S_{\text{оптим.технл.}}}}$  – середній обсяг вантажу на кінець прийнятого періоду, що виникає при умові експлуатації оптимального та надлишкового робочого парку транспортних засобів.

Отже, при біржовій вартості одного бушеля зерна (один бушель = 27,2155 кг) у 536,17 центів США (за даними 2023 року [100]) можна встановити залежність формування вартості вантажної маси, яка формується при критично низьких розмірах парку транспортних засобів.

Для річного вантажопотоку у розмірі один мільйон тонн (прогнозні данні) для автомобільної транспортної системи спостерігається лінійна залежність між зниженням робочого парку вантажних автомобілів та розміром збільшення вартості вантажної маси (рисунок 4.22). Зазначена закономірність повністю відповідає закономірності формування вантажної маси в тонах для автомобільної транспортної мережі (рисунок 4.18).

Для залізничної транспортної системи спостерігається нелінійна закономірність формування вартості вантажної маси при неплановому зниженні робочого парку наявних відправницьких маршрутів (рисунок 4.23), що також відповідає характеру формування вантажної маси (рисунок 4.20).

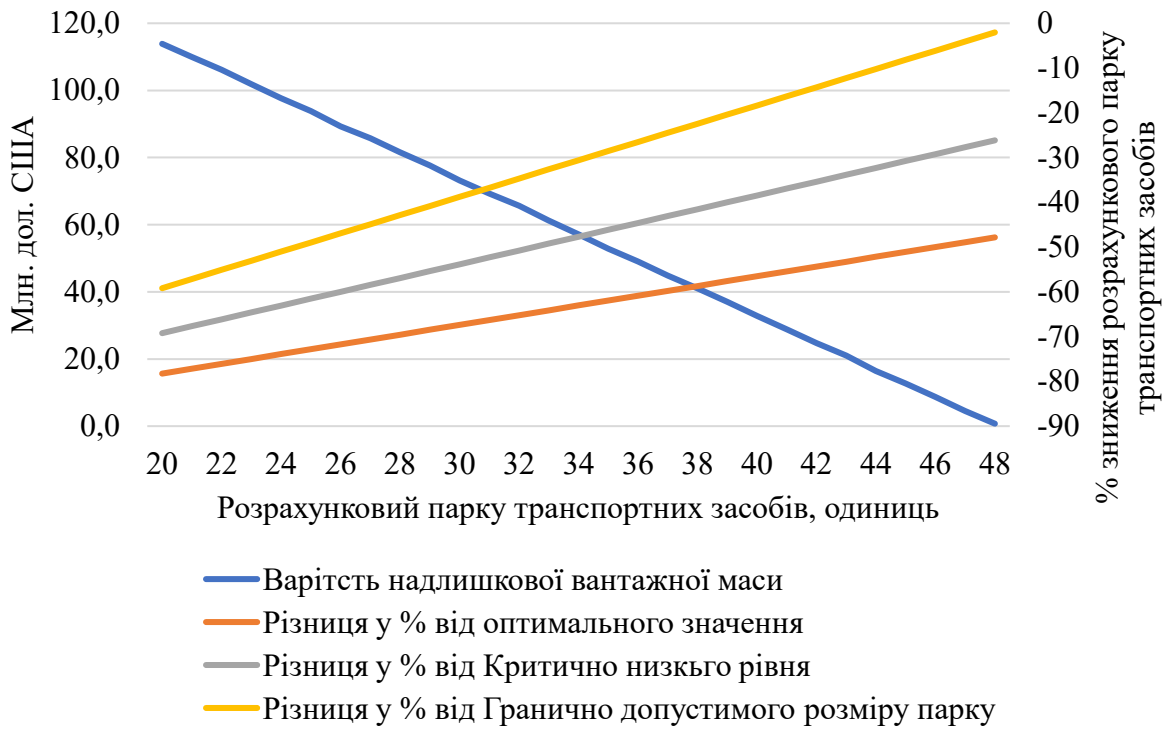


Рисунок 4.22 – Залежність формування річного обсягу надлишкової вантажної маси в автомобільній транспортній системі при зниженні парку вантажних автомобілів для обсягу перевезень в 1 млн. тонн

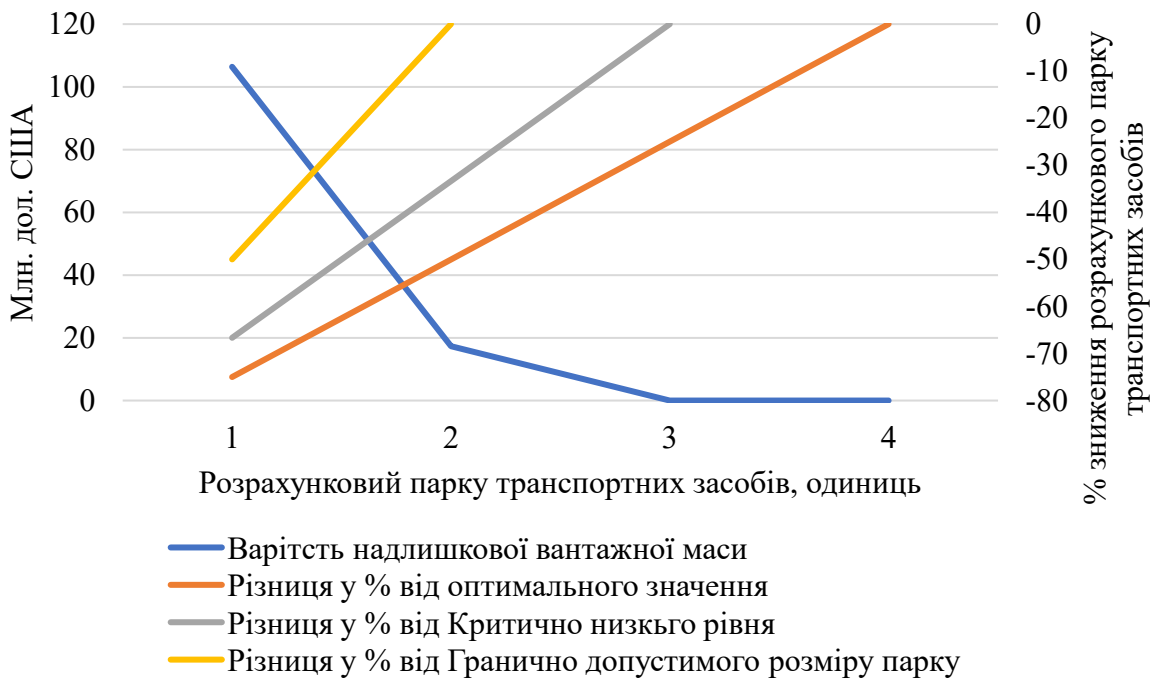


Рисунок 4.23 – Залежність формування річного обсягу надлишкової вантажної маси в залізничній транспортній системі при зниженні розрахункового парку відправницьких маршрутів для обсягу перевезень в 1 млн. тонн

#### 4.4 Висновки по розділу 4

На основі результатів статистичного аналізу та математичного моделювання, проведених у другому розділі, а також із використанням розроблених оптимізаційної математичної та імітаційної моделей, представлених у третьому розділі, було здійснено серію експериментів для моделювання типових умов експортних перевезень зернових культур з України. В якості пункту зародження та відправлення вантажів було обрано Полтавську область України, яка, завдяки своєму розташуванню в центральній частині країни, забезпечує оптимальні умови для сухопутного транспортування до морських торговельних портів. У межах цього маршруту реалізовано мультимодальний ланцюг постачання.

Експериментальні дослідження включали три серії експериментів, спрямованих на аналіз різних обсягів вантажоперевезень із Полтавської області. Перший експеримент базувався на даних 2021 року із річним обсягом перевезень 883 560 тонн. Другий експеримент враховував прогнозований річний обсяг перевезень у розмірі 1 млн. тонн. Третій експеримент був спрямований на аналіз прогнозованого обсягу 1,5 млн. тонн.

Результати дослідження показали, що щільність імовірності розподілу часу очікування вантажів для вантажних автомобілів та залізничних відправницьких маршрутів відповідає нормальному закону розподілу. Аналогічно, щільність розподілу часу обороту вантажних автомобілів та залізничних маршрутів також підпорядковується нормальному закону розподілу.

Встановлено, що для типових технологічних умов експлуатації транспортних засобів та технологічних систем перевезення зернових культур обсягом 883 560 тонн на рік оптимальні параметри робочого парку складають 79 вантажних автомобілів (із коефіцієнтом завантаження парку 0,54) та три залізничні відправницькі маршрути (із коефіцієнтом завантаження парку 0,63%).

Для перевезення одного мільйона тонн зернових на рік оптимальний робочий парк становить 92 вантажні автомобілі (із коефіцієнтом завантаження 0,52) та чотири залізничні відправницькі маршрути (із коефіцієнтом завантаження 0,54%). У

випадку перевезення 1,5 млн. тонн на рік необхідно задіяти 106 вантажних автомобілів (із коефіцієнтом завантаження 0,68) та п'ять залізничних відправницьких маршрутів (із коефіцієнтом завантаження 0,64%).

У кожному з розглянутих випадків забезпечується оптимальний рівень завантаження парку транспортних засобів, що дозволяє досягти мінімально можливого часу доставки вантажів по суші. Відповідно до порядкових номерів експериментів, цей час становить 322 години, 292 години та 217 годин.

Інша серія експериментів виявила закономірності формування ключових технологічних параметрів функціонування автомобільних та залізничних транспортно-технологічних ліній залежно від розрахункового парку вантажних автомобілів і залізничних відправницьких маршрутів. Встановлено три критичних рівні розмірів робочого парку транспортних засобів:

- оптимальна межа – за якої забезпечується оптимальна робота транспортної системи;
- критична межа – за якої транспортна система наближається до перевищення межі оптимальності;
- гранично допустима межа – за якої система працює з підвищеним ризиком порушень у технологічному процесі та повної зупинки.

За отриманими даними визначено умови, за яких формуються надлишкові запаси вантажів на транзитних пунктах перевантаження. Такі запаси виникають через неефективне використання транспортного парку, що обумовлено технологічними затримками, відмовами під час вантажних операцій або зменшенням розмірів робочого парку.

Встановлено, що обсяг критичної маси для автомобільної транспортної мережі формується за лінійною функцією залежно від розміру робочого парку автомобілів. Для залізничної транспортної мережі ця закономірність є нелінійною.

Встановлено залежності між середнім часом доставки вантажів по суші та обсягом формування вантажної маси для автомобільної та залізничної транспортних систем. Для автомобільної транспортної системи ці залежності з високою

імовірністю апроксимуються логарифмічними функціями, тоді як для залізничної транспортної системи – лінійними функціями.

Виявлено закономірності формування річного обсягу надлишкової вантажної маси та її грошового еквіваленту залежно від розміру робочого парку транспортних засобів. Зокрема, встановлено критичне зниження потреби в рухомому складі порівняно з раніше визначеними граничними рівнями сталого функціонування транспортних систем. Для автомобільної транспортної системи така залежність, аналогічно до закономірності формування вантажної маси, є лінійною, тоді як для залізничної транспортної системи – нелінійною.

При зменшенні робочого парку вантажних автомобілів на 12 одиниць (25% від гранично допустимого розміру парку) наприкінці року експлуатації накопичується 237 000 тонн вантажної маси, що за даними 2025 року еквівалентно 45 млн. доларів США. Аналогічне зменшення робочого парку залізничних відправницьких маршрутів на одну одиницю (50% від гранично допустимого рівня) призводить до формування 544 000 тонн вантажної маси, що за біржовими цінами 2025 року становить 106 млн. доларів США.

Результати експериментів свідчать, що збільшення робочого парку відносно оптимальних розрахункових значень не покращує технологічні показники функціонування транспортних систем, зокрема середній час доставки вантажу. Натомість це призводить до зростання часу очікування транспортними засобами вантажів для відправлення та збільшення тривалості вантажного обороту транспортних засобів.

## ВИСНОВКИ

1. За даними офіційної статистики, у період з 2011 по 2021 роки в Україні спостерігалось стійке зростання обсягів виробництва зернових, зернобобових, продуктів перемолу та олійних культур, орієнтованих на експорт. Станом на маркетинговий рік 2021/2022 цей показник досяг приблизно 61 млн. тонн. Відповідно до прогнозів Міністерства економіки України, до 2027 року обсяги експорту зростуть ще на 14 млн. тонн, а до 2030 року можуть сягнути 80 млн. тонн.

За даними АТ «Українські залізниці», розподіл вантажної маси зернових і зернобобових, призначених для експорту, в межах території України є нерівномірним. У 2021 році найбільші обсяги спостерігалися у Південно-Західній регіональній філії (9,87 млн. тонн) та Південній регіональній філії (7,54 млн. тонн).

Загальна структура вагонопотоку зернових умовно поділяється на три групи:

- велика частка зернових за невеликих загальних обсягів вантажних перевезень – Донецька та Придніпровська регіональні філії;
- низька частка зернових за середніх загальних обсягів вантажних перевезень – Львівська та Одеська регіональні філії;
- велика частка зернових за значних загальних обсягів вантажних перевезень – Південно-Західна та Південна регіональні філії.

Найбільш актуальною у контексті формування перевізної роботи є ситуація у Південно-Західній та Південній регіональних філіях. У цих регіонах формуються найбільші вантажопотоки зернових, причому їхні території знаходяться на значній відстані від прикордонних пунктів перетину.

2. Найбільш раціональним способом доставки масових зернових у межах глобальних ланцюгів постачання є використання мультимодального транспортно-технологічного маршруту, що включає такі етапи:

- 1) автомобільний транспорт: здійснює дистрибуцію, первинний збір вантажів із місць їх формування та перевезення до пунктів стикування із залізничним транспортом;

2) залізничний транспорт: забезпечує організацію зернових маршрутів від місць навантаження до терміналів морських торговельних портів або пунктів стикування з водним транспортом;

3) водний (морський) транспорт: використовується для перевезення великих партій вантажів до торговельних морських портів країн–імпортерів української аграрної продукції.

Такий мультимодальний підхід є одним із найефективніших, оскільки забезпечує: найнижчу собівартість транспортування; високу надійність доставки; значну провізну спроможність у глобальних ланцюгах постачання.

3. При аналізі транспортно-технологічного мультимодального процесу постачання зернових і зернобобових культур у межах експортних ланцюгів постачання встановлено, що основним критерієм, який системно визначає рівень ефективності організації процесу, є загальний середній час доставки вантажу. З урахуванням реалій України цей критерій може бути звужений до середнього загального часу постачання зернових у межах території України до прикордонних переходів, зокрема до морських торговельних портів.

Процес доставки зернових у складному, багатофакторному та багатоелементному мультимодальному ланцюзі постачання було формалізовано за допомогою оптимізаційної математичної моделі. Критерієм оптимізації обрано час доставки вантажу сушею – від моменту завантаження у вантажний автомобіль до завантаження у морське торговельне судно. Основними обмеженнями моделі виступають: розрахунковий рівень завантаження парку транспортних засобів.

4. Оскільки цільова функція та обмеження оптимізаційної математичної моделі представлені у неявному вигляді, їхня реалізація була виконана через комп'ютерну імітацію. Імітаційна модель процесу доставки зернових у змішаному автомобільно-залізнично-водному сполученні враховує багатофазовий і складний характер цього процесу, який включає множину вихідних параметрів, підсистем і технологічних елементів. Для її побудови застосовано гібридний підхід, що об'єднує два принципи:

- дискретно-подієвий принцип, який використовується для симуляції технологічних процесів, таких як обробка вантажів і обслуговування транспортних одиниць на об'єктах транспортної інфраструктури.

- агентний принцип, що дозволяє моделювати взаємодію різних підсистем і елементів у загальній транспортно–технологічній системі доставки зернових.

Для забезпечення достовірності результатів проведено серію експериментів з однаковою кількістю реплікацій (400 реплікацій) та різною тривалістю модельного часу (від 1 до 30 місяців). У ході досліджень встановлено, що при граничному значенні однієї реплікації та модельному часі не менше трьох місяців досягається достовірність результатів на рівні 95%, з похибкою, що не перевищує 0,05.

5. На основі результатів статистичного аналізу та математичного моделювання було проведено серію експериментів для моделювання типових умов експортних перевезень зернових культур з України. Як пункт зародження та відправлення вантажів обрано Полтавську область, яка, завдяки своєму розташуванню в центральній частині країни, забезпечує найбільш типові умови для сухопутного транспортування до морських торговельних портів. У межах цього маршруту реалізовано мультимодальний ланцюг постачання.

Експериментальні дослідження включали три серії експериментів, спрямованих на аналіз різних обсягів вантажоперевезень із Полтавської області. Перший експеримент базувався на даних 2021 року з річним обсягом перевезень у 883 560 тонн. Другий експеримент враховував прогнозований річний обсяг перевезень у розмірі одного мільйона тонн. Третій експеримент був зосереджений на аналізі прогнозованого обсягу півтора мільйона тонн.

Експериментально встановлено, що для перевезення одного мільйона тонн зернових на рік оптимальний робочий парк становить 92 вантажні автомобілі (із коефіцієнтом завантаження 0,52) та чотири залізничні відправницькі маршрути (із коефіцієнтом завантаження 0,54). У випадку перевезення півтора мільйона тонн на рік необхідно задіяти 106 вантажних автомобілів (із коефіцієнтом завантаження 0,68) та п'ять залізничних відправницьких маршрутів (із коефіцієнтом завантаження 0,64).

У кожному з розглянутих сценаріїв забезпечується оптимальний рівень завантаження транспортних засобів, що дозволяє досягти мінімально можливого часу доставки вантажів сушею. Відповідно до порядкових номерів експериментів, цей час становить 322 години, 292 години та 217 годин.

6. Інша серія експериментів виявила закономірності формування ключових технологічних параметрів функціонування автомобільних і залізничних транспортно-технологічних ліній залежно від розрахункового парку вантажних автомобілів і залізничних відправницьких маршрутів. Встановлено три критичних рівні розмірів робочого парку транспортних засобів:

- 1) оптимальна межа – забезпечує оптимальну роботу транспортної системи;
- 2) критична межа – система наближається до перевищення межі оптимальності;
- 3) гранично допустима межа – система працює з підвищеним ризиком порушень у технологічному процесі або повної зупинки.

На основі отриманих даних визначено умови, за яких формуються надлишкові запаси вантажів на транзитних пунктах перевантаження. Такі запаси виникають через неефективне використання транспортного парку, зокрема внаслідок технологічних затримок, відмов під час вантажних операцій або скорочення розміру робочого парку.

Для автомобільної транспортної мережі обсяг критичної маси вантажів формується за лінійною залежністю від розміру робочого парку автомобілів. Для залізничної транспортної мережі ця залежність є нелінійною.

Встановлено залежності між середнім часом доставки вантажів сушею та обсягом формування вантажної маси. Для автомобільної транспортної системи ці залежності добре апроксимуються логарифмічними функціями. Для залізничної транспортної системи вони описуються лінійними функціями.

Виявлено закономірності формування річного обсягу надлишкової вантажної маси та її грошового еквіваленту залежно від розміру робочого парку транспортних засобів. При зменшенні робочого парку вантажних автомобілів на 12 одиниць (25% від гранично допустимого розміру) наприкінці року накопичується 237 000 тонн

вантажної маси. Це відповідає 45 млн доларів США (за біржовими цінами 2025 року). Скорочення робочого парку залізничних відправницьких маршрутів на одну одиницю (50% від гранично допустимого рівня) призводить до формування 544 000 тонн вантажної маси, що еквівалентно 106 млн. доларів США (за цінами 2025 року).

Збільшення робочого парку відносно оптимальних розрахункових значень не покращує технологічні показники функціонування транспортних систем. Зокрема, середній час доставки вантажу не зменшується. Натомість спостерігається зростання часу очікування транспортними засобами вантажів для відправлення та збільшення тривалості вантажного обороту транспортних засобів.

## СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Хоменко Ю. Л., Окорочков А. М. Дослідження експортних вантажопотоків зернових з України. *Транспортні системи та технології перевезень*. 2023. Вип. 26. С. 85–92. DOI: 10.15802/tstt2023/293358.
2. Khomenko Yu., Matsiuk V., Okorokov A., Gorobchenko O. Development of a simulation model of grain delivery in global supply chains. *Scientific Reports of the National University of Life and Environmental Sciences of Ukraine*. 2024. Vol. 2, № 5. P. 21-35. DOI: 10.31548/dopovidi/5.2024.21.
3. Хоменко Ю. Л. Аналіз ефективності існуючих транспортно-технічних ліній транспортування зернових з України. *Транспортні системи та технології перевезень*. 2025. Вип. 30. С. 79-87. DOI: 10.15802/tstt2025/340140.
4. Khomenko Yu., Okorokov A., Matsiuk V., Zhuravel I., Pavlenko O. Revealing the causes of delays at transit points along an intermodal grain supply chain. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2025. Vol. 4, № 3 (136). P. 40-50. DOI: 10.15587/1729-4061.2025.338166.
5. Zaruba O., Okorokov A., Vernyhora R., Prokopa O., Khomenko Y. Assessing the efficiency of centralized use of train formations within an extensive supply network for metallurgical production. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2025. Vol. 5, № 3 (137). P. 48–56. DOI: 10.15587/1729-4061.2025.342416
6. Окорочков А. М., Вернигора Р. В., Хоменко Ю. Л. Альтернативні варіанти перевезення аграрної продукції на експорт та їх загальна оцінка. *Збірник тез доповідей наукової конференції професорсько-викладацького складу, аспірантів, студентів та співробітників відокремлених структурних підрозділів університету (м. Київ, Україна, 17–19 травня 2023 року)*. Київ: НТУ, 2023. Вип. 79. С. 341-342.
7. Khomenko Y., Okorokov A., Vernyhora R. Logistics systems for the export of agricultural products of Ukraine in the context of military aggression. *The proceedings of the international scientific-practical conference on «The fourth industrial revolution and innovative technologies» (м. Гянджа, республіка Азербайджан, 2–3 травня 2023 року)*. Баку: АТУ, 2023. Ч. 2. С. 309-310.

8. Огороков А. М., Вернигора Р. В., Хоменко Ю. Л. Проблеми та ризики при перевезенні зернових через західні кордони України. *Матеріали 82 Міжнародної науково-практичної конференції «Проблеми та перспективи розвитку залізничного транспорту»* (м. Дніпро, Україна, 20–21 квітня 2023 року). Дніпро: УДУНТ, 2023. С. 250-251.

9. Хоменко Ю. Л., Огороков А. М. Моделювання процесу доставки зернових у напрямку ЄС. *Тези доповідей міжнародної науково-технічної конференції «Університетська наука – 2024»* (м. Дніпро, Україна, 23-24 травня 2024 року). Дніпро: ДВНЗ «ПДТУ», 2024. Том 1. С. 195-197.

10. Хоменко Ю. Л. Формалізація процесу постачання зернових у глобальних ланцюгах постачання. *Збірник тез доповідей Всеукраїнської науково-технічної конференції студентів і молодих учених «Наука і сталий розвиток транспорту 2024»* (м. Дніпро, Україна, 27 листопада 2024 року). Дніпро: УДУНТ, 2024. С. 55-56.

11. Огороков А. М., Хоменко Ю. Л., Medina Carlos Moyses Carranza. Складові системи моделі постачання зернових вантажів на експорт. *Тези 13-ї міжнародної науково-практичної конференції «Перспективи взаємодії залізниць та промислових підприємств»* (м. Дніпро, Україна, 28-29 листопада 2024 року). Дніпро: УДУНТ, 2024. С. 64-65.

12. Хоменко Ю. Л., Огороков А. М. Оптимізація параметрів лінії постачання зернових у змішаному сполученні. *Тези доповідей міжнародної науково-технічної конференції «Університетська наука – 2025»* (м. Дніпро, Україна, 15-16 травня 2025 року). Дніпро: ДВНЗ «ПДТУ», 2025. Том 1. С. 173-174.

13. Хоменко Ю. Л., Огороков А. М. Підвищення ефективності інтермодальних ланцюгів постачання зернових засобами агентної симуляції. *Матеріали 21 науково-практичної міжнародної конференції «Міжнародна транспортна інфраструктура, індустриальні центри та корпоративна логістика»* (м. Харків, Україна, 5-6 червня 2025 року). Харків: УкрДУЗТ, 2025. С. 169-171.

14. Гайда Ю. І., Шайнюк Б. Л. Ринок зерна в ретроспективі та перспективі: глобальний аналіз. *Innovation and Sustainability*. 2023. № 4. С. 30-40. DOI: 10.31649/ins.2023.4.30.40.

15. United Nations Conference on Trade and Development: Key Statistics and Trends in International Trade 2021: official site. URL: [https://unctad.org/system/files/official-document/ditctab2022d3\\_en.pdf](https://unctad.org/system/files/official-document/ditctab2022d3_en.pdf) (дата звернення: 20.05.2022).

16. Зеліско Н., Маркович Н., Васирина О. Оцінка ризиків продовольчої безпеки України в умовах воєнного стану. *Аграрна економіка*. 2022. Т. 15, № 1-2. С. 3-8. DOI: 10.31734/agrarecon2022.01-02.003

17. Гавриленко Н. М., Широкий Г. М. Світовий ринок зерна: стан та тенденції / Національний інститут стратегічних досліджень. Центр зовнішньополітичних досліджень. URL: [https://niss.gov.ua/sites/default/files/2022-02/rynok-zerna\\_gavrylenko\\_0422022.pdf](https://niss.gov.ua/sites/default/files/2022-02/rynok-zerna_gavrylenko_0422022.pdf) (дата звернення: 04.02.2026).

18. Elleby C., Pérez Domínguez I., Adenauer M., Genovese G. Impacts of the COVID-19 Pandemic on the Global Agricultural Markets. *Environmental and Resource Economics*. 2020. Vol. 76, № 4. P. 1067-1079. DOI: 10.1007/s10640-020-00473-6

19. Statistics : official site / The Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO). URL: <https://www.fao.org/home/en/> (дата звернення: 21.09.2022).

20. Державна служба статистики України : офіційний сайт. URL: <https://www.ukrstat.gov.ua/> (дата звернення: 30.09.2022).

21. International Grains Council. URL: [https://www.igc.int/en/gmr\\_summary.aspx](https://www.igc.int/en/gmr_summary.aspx) (дата звернення: 18.09.2022).

22. Нечипорук А., Котова М., Кочубей Д. Експорт України в умовах воєнного стану. *Зовнішня торгівля: економіка, фінанси, право*. 2023. № 5. С. 18-32. DOI: 10.31617/3.2023(130)02.

23. Кабінет Міністрів України : офіційний сайт. URL: <https://www.kmu.gov.ua> (дата звернення: 23.08.2022).

24. Redko K., Tkachenko I. Analysis of the structure of the international trade between Ukraine and the EU. *Економічний вісник НТУУ «Київський політехнічний інститут»*. 2021. № 18. С. 39-43. DOI: 10.20535/2307-5651.18.2021.231178.

25. Кравченко М. А. Удосконалення процесу залізничних перевезень зернових вантажів на основі принципів райдшерингу : дис. ... д-ра філос. : 275 / УкрДУЗТ. Харків, 2024. 228 с.

26. Филюк Г., Кучин С. Ринок зерна України: вплив внутрішніх факторів на пропозицію та продовольчу безпеку. *Актуальні проблеми економіки*. 2025. № 3. С. 221-229. DOI: 10.32752/1993-6788-2025-1-285-221-229

27. Вернигора Р. В., Рустамов Р. Ш. Аналіз системи зберігання українського зерна. *Транспортні системи та технології перевезень*. 2017. № 13. С. 10-18. DOI: 10.15802/tstt2017/110763

28. Ковальський Ю. В. Логістичні шляхи експорту зерна в умовах воєнного стану. *Український журнал прикладної економіки та техніки*. 2024. Т. 9, № 1. С. 118-122. DOI: 10.36887/2415-8453-2024-1-19.

29. Панфілова А., Полторак А., Кувшинова А., Бурковська А., Доценко Н. Тренди у світовій торгівлі зерном і насінням, позиція України на глобальному ринку. *Scientific Horizons*. 2025. Т. 28, № 5. С. 142-157. DOI: 10.48077/scihor5.2025.142

30. Yanovska V., Król M., Pittman R. The logistics of grain exports from wartime Ukraine: What are the highest priority areas to Address? *Transportation Research Interdisciplinary Perspectives*. 2025. Vol. 30. Art. 101363. DOI: 10.1016/j.trip.2025.101363.

31. Deep State : веб-сайт. URL: <https://deepstatemap.live/en/#7/48.1477632/28.8830566> (дата звернення: 20.12.2022).

32. Deininger K., Ali D. A., Kussul N., Shelestov A., Lemoine G., Yailimova H. Quantifying war-induced crop losses in Ukraine in near real time to strengthen local and global food security. *Food Policy*. 2023. Vol. 115. 102418. DOI: 10.1016/j.foodpol.2023.102418

33. Fernandes G., Teixeira P., Santos T. A. The impact of the Ukraine conflict in internal and external grain transport costs. *Transportation Research Interdisciplinary Perspectives*. 2023. Vol. 19. Art. 100803. DOI: 10.1016/j.trip.2023.100803.

34. Kryshchal H. O. The Role of Logistics in the Development of Agriculture of Ukraine in the War Conditions. *Science and Innovation*. 2023. № 19 (2). P. 73-82. DOI: 10.15407/scine19.02.073.

35. Статистика вирощування зернових в Україні. Share UA Potential : веб-сайт. URL: <http://shareuapotential.com/ru/BE/ukrainian-zerno-statistika-vyraschivania-2020.html> (дата звернення: 22.04.2023).

36. Lohosha R., Mykhalchyshyna L., Prylutskyi A., Gontaruk Y. Impact of Global Economic Transformations on Agricultural Export Strategy of Ukraine. *Financial and Credit Activity Problems of Theory and Practice*. 2024. Vol. 6, № 59. P. 115-131. DOI: 10.55643/fcaptp.6.59.2024.4532

37. Остапенко С. О. Регулювання експорту-імпорту аграрної продукції в нових умовах розвитку міжнародної торгівлі. Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису. Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора філософії за спеціальністю 051 «Економіка». Київ, 2021. 222 с.

38. Деблокування українських морських портів є найкращим способом запобігання глобальному голоду та збереження українського аграрного сектору економіки / Інформаційне управління комітету з питань бюджету. URL: <https://surl.li/nljkaz> (дата звернення: 11.07.2023).

39. Перевезення врожаю зернових та зернобобових у 2021/2022 маркетинговому році / Офіс ефективного реагування. URL: <https://surl.li/xczbyn> (дата звернення: 15.07.2023).

40. Устенко М. О. Основні конкурентні переваги залізничного транспорту. *Вісник економіки транспорту і промисловості*. 2009. № 28. С. 100-103. <http://lib.kart.edu.ua/handle/123456789/9707>

41. Модернізація залізничної інфраструктури як чинник підтримки національної економіки в умовах війни на виснаження / Національний інститут стратегічних досліджень. URL: <https://niss.gov.ua/doslidzhennya/ekonomika/modernizatsiya-zaliznychnoyi-infrastruktury-yak-chynnyk-pidtrymky> (дата звернення: 13.01.2023).

42. Пешко М. І., Завербний А. С. Проблеми та перспективи зміни ланцюгів поставок з метою мінімізування втрат під час війни. *Економіка та суспільство*. 2022. Вип. 44. DOI: 10.32782/2524-0072/2022-44-5.

43. Кузяк В., Балик У., Грещак М. Оптимізація логістичного забезпечення аграрної продукції в умовах війни. *Вісник Львівського національного екологічного університету. Серія «Економіка АПК»*. 2023. № 30. С. 157-162. DOI: 10.31734/economics2023.30.157.

44. Мямлін С. С. Вдосконалення конструкції рухомого складу залізниць для забезпечення інтермодальних перевезень зернових. *Залізничний транспорт України*. 2023. № 1. С. 42-50. DOI: 10.34029/2311-4061-2023-146-1-42-50.

45. Brovko L. «Ukrzaliznytsia» launched intermodal trains from the Polish port to four cities of Ukraine. *Бабель* : веб-сайт. URL: <https://babel.ua/en/news/96623-ukrzaliznytsia-launched-intermodal-trains-from-the-polish-port-to-four-cities-of-ukraine> (дата звернення: 30.07.2023).

46. Перевезення зерна залізницею маршрутизовані на 60%. *Rail.insider* : веб-сайт. URL: <https://www.railinsider.com.ua/perevezennya-zerna-zaliznyczeyu-marshrutyrovani-na-60/> (дата звернення: 28.03.2024).

47. Аналітика. Центр транспортних стратегій : вебсайт. URL: [cfts.org.ua](https://cfts.org.ua) (дата звернення: 10.04.2024)

48. Forkenbrock D. J. Comparison of external costs of rail and truck freight transportation. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*. 2001. Vol. 35, Iss. 4. P. 321-337. DOI: 10.1016/S0965-8564(99)00061-0.

49. Kenkel P., Henneberry S., Agustini H. N. An Economic Analysis Of Uit-Train Facility Investment. *Southern Agricultural Economics Association Annual Meeting (Tulsa, Oklahoma, February 14-18), 2004*. URL: <http://ageconsearch.umn.edu/bitstream/34748/1/sp04ke02.pdf> (дата звернення: 04.02.2026). DOI: 10.22004/ag.econ.34748.

50. Перелік умов щодо організації перевезень вантажів маршрутами. Рішення правління УЗ від 14.10.2024 / Укрзалізниця. URL:

[https://www.uz.gov.ua/cargo\\_transportation/general\\_information/information\\_environment/639510/](https://www.uz.gov.ua/cargo_transportation/general_information/information_environment/639510/) (дата звернення: 04.02.2026).

51. В Укрзалізниці навели деталі щодо організації перевезень вантажів маршрутами. *Rail.insider* : веб-сайт. URL: <https://www.railinsider.com.ua/v-ukrzhaliznyczi-navely-detali-shhodo-organizacziyi-perevezen-vantazhiv-marshrutamy/> (дата звернення: 04.02.2026).

52. Бауліна Г. С., Богомазова Г. Є., Мішков В. С. Розробка моделі формування ступінчастих маршрутів із зерновими вантажами на залізницях України. *Збірник наукових праць Українського державного університету залізничного транспорту*. 2019. Вип. 187. С. 42-52. DOI: 10.18664/1994-7852.187.2019.196337.

53. Морозов А. В. Вдосконалення методів оптимізації кільцевих маршрутів на транспортній мережі : автореф. дис. ... канд. техн. наук : 05.22.01 / УкрДАЗТ. Харків, 2010. 19 с.

54. Прокудін Г. С. Моделі та методи оптимізації вантажних перевезень в транспортних системах : автореф. дис. ... д-ра техн. наук : 05.13.06 / НТУ. Київ, 2009. 44 с.

55. Зінченко І. В. Система підтримки прийняття рішень при управлінні транспортуваннями в умовах невизначеності : автореф. дис. ... канд. техн. наук : 05.22.01 / УкрДАЗТ. Харків, 2007. 20 с.

56. Turpak S., Ostrohliad O., Vasylieva L. Improvement of the process of delivery of rolled metal products in the post-war period in the conditions of ecologization of the transportation. *Lecture Notes in Networks and Systems*. 2025. DOI: 10.1007/978-3-031-87379-9\_35

57. Серета Б. П., Турпак С. М., Романюк С. О., Муковська Д. Я. Підвищення ефективності перевезень на технологічних маршрутах транспортно-виробничої системи перевезення металургійних шлаків. *Вісник машинобудування та транспорту*. 2023. Vol. 17, No. 1. P. 147–152. DOI: 10.31649/2413-4503-2023-17-1-147-152

58. Tymchenko N., Fedorenko I. The Economic Efficiency of Container Transportation in the Export of Ukraine's Agricultural Products. *Причорноморські економічні студії*. 2025. № 93. P. 100-105. DOI: 10.32782/bses.93-15

59. Naumov V., Aloszynski Y., Bauer M. Sustainable Solutions for Ukrainian Grain Transit Through Poland: Enhancing Terminal Infrastructure. *Sustainability*. 2025. Vol. 17, № 3. 1195. DOI: 10.3390/su17031195

60. Kovalev A., Prodashchuk S., Kravets A., Mkrtychian D., Prodashchuk M. Improvement of the grain cargo handling technology on the basis of resource-saving. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2021. Vol. 1021. Art. 012006. DOI: 10.1088/1757-899X/1021/1/012006.

61. Нікішина О. В. Принципи формування логістичних ланцюгів товарних ринків: конвергенція підходів. *Економіка харчової промисловості*. 2019. Т. 11, № 3. С. 3-15. DOI: 10.15673/fe.v11i3.1456.

62. Москвіченко І. М., Стаднік В. Г., Коросан А. П. Підвищення якості послуг організації доставки контейнерних вантажів компаніями логістичного аутсорсингу з України в умовах морської блокади портів. *Науковий вісник Полтавського університету економіки і торгівлі*. 2023. № 1 (107). С. 19-28. DOI: 10.37734/2409-6873-2023-1-3.

63. Ukraine – Logistics Recovery and Connectivity Project. The World Bank. 2025. 136 p. URL: <https://surl.li/cvbmzy> (дата звернення: 10.08.2025)

64. Elevatorist.com ranked Ukraine's grain storage capacity leaders in 2021. *Latifundist.com* : major agrobusiness website. URL: <https://latifundist.com/en/novosti/58065-nazvano-desyatku-krashchih-linijnih-elevatoriv-u-2021-rotsi> (дата звернення: 20.05.2023).

65. Арсененко Д. В. Удосконалення логістичного управління транспортуванням зернових вантажів залізничним транспортом : дис. ... канд. техн. наук : 05.22.01 / УкрДУЗТ. Харків, 2020. 145 с.

66. Бабаченко М., Голубкова І., Яворська А., Лисенко Н., Кучер І. Управління підприємствами морського транспорту в умовах невизначеності. *Збірник наукових*

праць «Вчені записки». 2024. № 35 (2). С. 49-63. DOI: 10.33111/vz\_kneu.35.24.02.05.033.039 (дата звернення: 23.12.2025).

67. Caplice C. Reducing uncertainty in freight transportation procurement. *Journal of Supply Chain Management, Logistics and Procurement*. 2022. Vol. 4, Iss. 2. DOI: 10.69554/TSMO3211.

68. Yankovska L., Petryk I. Safety of Cargo Transportation in the Ukrainian Supply Chain: Risk Management and Legal Issues. *Law, Business and Sustainability Herald*. 2022. Vol. 2, № 1. P. 49-56. DOI: 10.46489/lbsh.2022-2-1-5.

69. Іпполітова І., Білоцерківський О., Гудименко В. Вплив логістичних процесів на ефективність управління запасами підприємства. *Економіка та суспільство*. 2024. Вип. 65. DOI: 10.32782/2524-0072/2024-65-9.

70. Vicente J. J. Optimizing Supply Chain Inventory: A Mixed Integer Linear Programming Approach. *Systems*. 2025. Vol. 13, № 1. Art. 33. DOI: 10.3390/systems13010033.

71. Syofra A. H., Tulus T., Mawengkang H., Zarlis M. An Optimization Model for Integrated Warehouse - Inventory - Transportation of a Multi-Echelon Supply Chain. *Engineering, Technology & Applied Science Research*. 2025. Vol. 15, № 3. P. 23956-23964. DOI: 10.48084/etasr.10932.

72. Кашканов А., Москалюк М. Невизначеність та її вплив на формування запасів запасних частин для забезпечення ефективності транспортних процесів. *Вісник машинобудування та транспорту*. 2024. Вип. 20, № 2. С. 74-80. DOI: 10.63341/vjmet/2.2024.74.

73. Mosca A., Vidyarthi N., Satir A. Integrated Transportation - Inventory Models: A Review. *Operations Research Perspectives*. 2019. Vol. 6. Art. 100101. DOI: 10.1016/j.orp.2019.100101.

74. Hesami Naghshbandi E. Impact of Transportation Time on Inventory Management Costs: Analyzing the Relationship in Food Waste Management. *Computer and Decision Making: An International Journal*. 2025. Vol. 2. P. 406-418. DOI: 10.59543/comdem.v2i.11119.

75. Nourbakhsh S. M., Bai Y., Maia G. D. N., Ouyang Y., Rodriguez L. Grain supply chain network design and logistics planning for reducing post-harvest loss. *Biosystems Engineering*. 2016. Vol. 151. P. 105-115. DOI: 10.1016/j.biosystemseng.2016.08.011.

76. Карнасюк І. М. Аналіз роботи залізниць та ціноутворення вартості перевезення зернових вантажів залізничним транспортом в умовах війни. *Сучасні технології в машинобудуванні та транспорті*. 2024. № 1 (22). С. 153-162. DOI: 10.36910/automash.v1i22.1356.

77. Chandrasiri C., Kiridena S., Dharmapriya S., Kulatunga A. K. Adoption of Multi-Modal Transportation for Configuring Sustainable Agri-Food Supply Chains in Constrained Environments. *Sustainability*. 2024. Vol. 16, № 17. Art. 7601. DOI: 10.3390/su16177601.

78. Haghani A. E. Rail freight transportation: A review of recent optimization models for train routing and empty car distribution. *Journal of Advanced Transportation*. 1987. Vol. 21, № 2. DOI: 10.1002/atr.5670210205.

79. Wilson W. W., Dahl B. Grain pricing and transportation: dynamics and changes in markets. *Agribusiness*. 2011. Vol. 27, № 4. DOI: 10.1002/agr.20277.

80. Верлан А. І. Підвищення ефективності перевезень вантажів у залізнично-водному сполученні за рахунок розвитку приватних припортових станцій : дис. ... канд. техн. наук : 05.22.01 / ДІТ. Дніпропетровськ, 2015. 178 с.

81. Grain and Soybean Industry Dynamics and Rail Service: Analytical Models of Rail Service Operations. *Northwestern University Transportation Center*. URL: <https://transportation.northwestern.edu/docs/research/featured-reports/analytical-models-full-report.pdf>.

82. Dick C., Clayton A. Impact of New Railway Technology on Grain Transportation in Western Canada. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*. 2001. Vol. 1742, № 1. DOI: 10.3141/1742-06.

83. William W., Prithviraj L. Secondary rail car markets for grain transportation and basis values. *Agribusiness*. 2021. Vol. 37, № 3. DOI: 10.1002/agr.21677.

84. Higa A. P. H., Neto J. G. M., Trajano R. G., De Castro H. K. Grain Flow Through the Northern Arch of Brazil. *Proceedings of PIANC Smart Rivers 2022*. Singapore :

Springer, 2023. Vol. 264. P. 1385–1397. (Lecture Notes in Civil Engineering). DOI: 10.1007/978-981-19-6138-0\_122.

85. Branco J. E. H., Bartholomeu D. B., Junior P. N. A., Filho J. V. C. Mutual analyses of agriculture land use and transportation networks: The future location of soybean and corn production in Brazil. *Agricultural Systems*. 2021. Vol. 194. Art. 103264. DOI: 10.1016/j.agsy.2021.103264.

86. Ivanov D., Dolgui A. Viability of intertwined supply networks: extending the supply chain resilience angles towards survivability. A position paper motivated by COVID-19 outbreak. *International Journal of Production Research*. 2020. Vol. 58, № 10. P. 2904-2915. DOI: 10.1080/00207543.2020.1750727

87. Christopher M. Logistics and Supply Chain Management. 6th ed. FT Publishing International, 2023. 336 p.

88. Top Strategic Supply Chain Technology Trends for 2024 / Gartner Research. URL: <https://www.gartner.com/en/documents/5090631> (дата звернення: 04.02.2026).

89. Oymatov R., Musaev I., Bakhriev M., Aminova G. Monitoring agricultural land areas using GIS-online program EOS DA: case study of Andijan region. *E3S Web of Conferences*. 2023. Vol. 401. Art. 02005. DOI: 10.1051/e3sconf/202340102005.

90. Satellite Data Analytics For Daily Earth Insights & Decision-making : official site. URL: <https://eos.com/> (дата звернення: 04.02.2026).

91. Connecting to Compete: Trade Logistics in the Global Economy – LPI Report. Washington, DC : World Bank, 2023. 78 p. URL: [https://lpi.worldbank.org/sites/default/files/2023-04/LPI\\_2023\\_report.pdf](https://lpi.worldbank.org/sites/default/files/2023-04/LPI_2023_report.pdf).

92. Supply Chain Resilience: The Shift from Just-in-Case to Just-in-Time 2.0 : report / ASCM. 2023. URL: <https://www.ascm.org/supply-chain-resilience/> (дата звернення: 10.01.2026).

93. Gholian-Jouybari F., Hajiaghaei-Keshteli M., Bavar A., Bavar Av., Mosallanezhad B. A design of a circular closed-loop agri-food supply chain network – A case study of the soybean industry. *Journal of Industrial Information Integration*. 2023. Vol. 36. Art. 100530. DOI: 10.1016/j.jii.2023.100530.

94. Romagnoli S., Tarabu C., Vishkaei B., De Giovanni P. The Impact of Digital Technologies and Sustainable Practices on Circular Supply Chain Management. *Logistics*. 2023. Vol. 7, № 1. Art. 1. DOI: 10.3390/logistics7010001.

95. Jung J., Blau G., Pekny J., Reklaitis G., Eversdyk D. A simulation based optimization approach to supply chain management under demand uncertainty. *Computers & Chemical Engineering*. 2004. Vol. 28, № 10. P. 2087-2106. DOI: 10.1016/j.compchemeng.2004.06.006.

96. Ge H., Nolan J. F., Gray R. S. Modelling the optimal testing strategies for preventing wheat handling risks. *Proceedings of the IASTED International Conference on Modelling, Simulation, and Identification*. 2011. DOI: 10.2316/P.2011.755-028.

97. Mazaraki A., Matsiuk V., Ilchenko N., Kavun-Moshkovska N., Grygorenko T. Development of a Multimodal (Railroad-Water) Chain of Grain Supply by the Agent-Based Simulation Method. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2020. Vol. 6, № 3 (108). P. 14-22. DOI: 10.15587/1729-4061.2020.220214.

98. Kuhla K., Kubiczek P., Otto C. Understanding agricultural market dynamics in times of crisis: The dynamic agent-based network model Agrimate. *Ecological Economics*. 2025. Vol. 229. Art. 108546. DOI: 10.1016/j.ecolecon.2025.108546.

99. Ge H., Gray R. S., Nolan J. F. Agricultural Supply Chain Optimization and Complexity: A Comparison of Analytic vs Simulated Results and Policies. *International Journal of Production Economics*. 2014. Vol. 159. P. 208–220. DOI: 10.1016/j.ijpe.2014.09.023.

100. Raza Z., Woxenius J., Vural C., Lind M. Digital transformation of maritime logistics: Exploring trends in the liner shipping segment. *Computers in Industry*. 2023. Vol. 145. Art. 103811. DOI: 10.1016/j.compind.2022.103811.

101. Tsolakis N., Zissis D., Papaefthimiou S., Korfiatis N. Towards AI driven environmental sustainability: an application of automated logistics in container port terminals. *International Journal of Production Research*. 2022. Vol. 60, № 14. P. 4508-4528. DOI: 10.1080/00207543.2021.1914355.

102. Namazov M., Matsiuk V., Bulgakova I., Vernyhora R. Agent-based simulation model of multimodal iron ore concentrate transportation. *Machinery & Energetics*. 2023. Vol. 14, № 1. P. 46-54. DOI: 10.31548/machinery/1.2023.46.

103. Україна 2021 року експортувала зернових культур на \$12,35 млрд / Українська зернова асоціація. URL: <https://uga.ua/news/ukrayina-2021-roku-eksportovala-zernovih-kultur-na-12-35-mlrd/> (дата звернення: 04.02.2023)

104. U.S. Department of Agriculture : official site. URL: <https://www.usda.gov/> (дата звернення: 27.12.2022).

105. Названо ТОП-10 найбільших імпортерів українського зерна за минулий рік. *Latifundist.com* : веб-сайт. URL: <https://latifundist.com/novosti/58224-nazvano-top-10-najbilshih-importeriv-ukrayinskogo-zerna-za-minulij-rik> (дата звернення: 27.12.2022).

106. 2021 року Китай посилив свої позиції лідера топ-10 імпортерів українського збіжжя – Богдан Духницький / Інститут аграрної економіки : веб-сайт. URL: <http://www.iae.org.ua/presscentre/archnews/3319-2021-roku-kytay-posylyv-svoyi-pozytsiyi-lidera-top-10-importeriv-ukrayinsko-ho-zbizhzhya-bohdan-dukhnyskyu.html> (дата звернення: 27.12.2022).

107. Експорт з України зернових, зернобобових (з продуктами їх переробки) та борошна 2022/2023 МР, тис. тонн станом на 04.01.2023 (дані Держмитслужби) / Міністерство аграрної політики та продовольства України : офіційний сайт. URL: <https://minagro.gov.ua/investoram/monitoring-stanu-apk/eksport-z-ukrayini-zernovih-zernobobovih-ta-boroshna> (дата звернення: 04.01.2023).

108. Eurostat / Європейська комісія (Eurostat). URL: <https://ec.europa.eu/eurostat> (дата звернення: 21.02.2023)

109. Транзитні тарифи : офіційний сайт / Укрзалізниця. URL: [https://www.uz.gov.ua/cargo\\_transportation/tariff\\_conditions/transit/454701/](https://www.uz.gov.ua/cargo_transportation/tariff_conditions/transit/454701/) (дата звернення: 04.02.2026).

110. Карвацька Н., Тюріна Н., Назарчук Т. Ретроспективний та перспективний аналіз зовнішньоекономічної діяльності України. *Herald of*

*Khmelnyskyi National University. Economic Sciences*. 2022. Vol. 304, No. 2(2). P. 219–226. DOI: 10.31891/2307-5740-2022-304-2(2)-34

111. Du J., Shepotylo O., Shi Y. Trade disintegration and agri-food trade: United Kingdom exit from EU. *The World Economy*. 2021. Vol. 45, No. 9. P. 2525–2546. DOI: 10.1111/twec.13735

112. Про морські порти України : Закон України від 17.05.2012 № 4709-VI. URL: zakon.rada.gov.ua (дата звернення: 14.01.2024).

113. Google Maps : веб-сайт. URL: <https://www.google.com.ua/maps> (дата звернення: 04.03.2024).

114. Мацюк В. І., Мироненко В. К., Кацман М. Д. Технологічна надійність залізничних транспортних систем : монографія. Київ : ФОП Лук'яненко В. В., ТПК «Орхідея», 2021. 348 с.

115. Мацюк В. І. Удосконалення системи розвозу місцевих вагонів в залізничному вузлі : дис. ... канд. техн. наук : 05.22.01 / КНУТД. Київ, 2008. 168 с.

116. Matsiuk V., Galan O., Prokhorchenko A., Tverdomed V. An agent-based simulation for optimizing the parameters of a railway transport system // *ICTERI-2021 : Proceedings of the 17th International Conference on ICT in Education, Research and Industrial Applications* (Kherson, Ukraine, Sept. 28-Oct. 2, 2021). 2021. Vol. 3013. P. 200-213. URL: <https://ceur-ws.org/Vol-3013/20210121.pdf> (дата звернення: 04.02.2026).

117. Matsiuk V., Ilchenko N., Pryimuk O., Kochubei D., Prokhorchenko A. Risk assessment of transport processes by agent-based simulation // *AIP Conference Proceedings*. 2022. Vol. 2557, № 1. P. 080003. DOI: 10.1063/5.0105913

118. Акулінічев В. М., Кудрявцев В. А., Корешков А. Н. Математичні методи в експлуатації залізниць (мова оригіналу — російська). М.: Транспорт. 1981. 223 с.

119. Світові ціни на пшеницю (NYMEX, Нью-Йорк). Index.Minfin.com.ua: веб-сайт. URL: <https://index.minfin.com.ua/ua/markets/wheat/> (дата звернення: 24.12.2023).

120. Matsiuk V., Prokhorchenko A., Tverdomed V., Ilchenko N. Improvement of efficiency in the organization of transfer trains at developed railway nodes by

implementing a «flexible model». *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2019. Vol. 2. №3 (98). P. 32-39. DOI: 10.15587/1729-4061.2019.162143.

121. Matsiuk V., Opalko V., Savchenko L., Zagurskiy O., Matsiuk N. Optimisation of transport and technological system parameters of an agricultural enterprise in conditions of partial uncertainty. *Machinery & Energetics*. 2023. Vol. 14, No. 3. P. 61-71. DOI: 10.31548/machinery/3.2023.61

## Додаток А

## Картограма зародження вантажопотоку

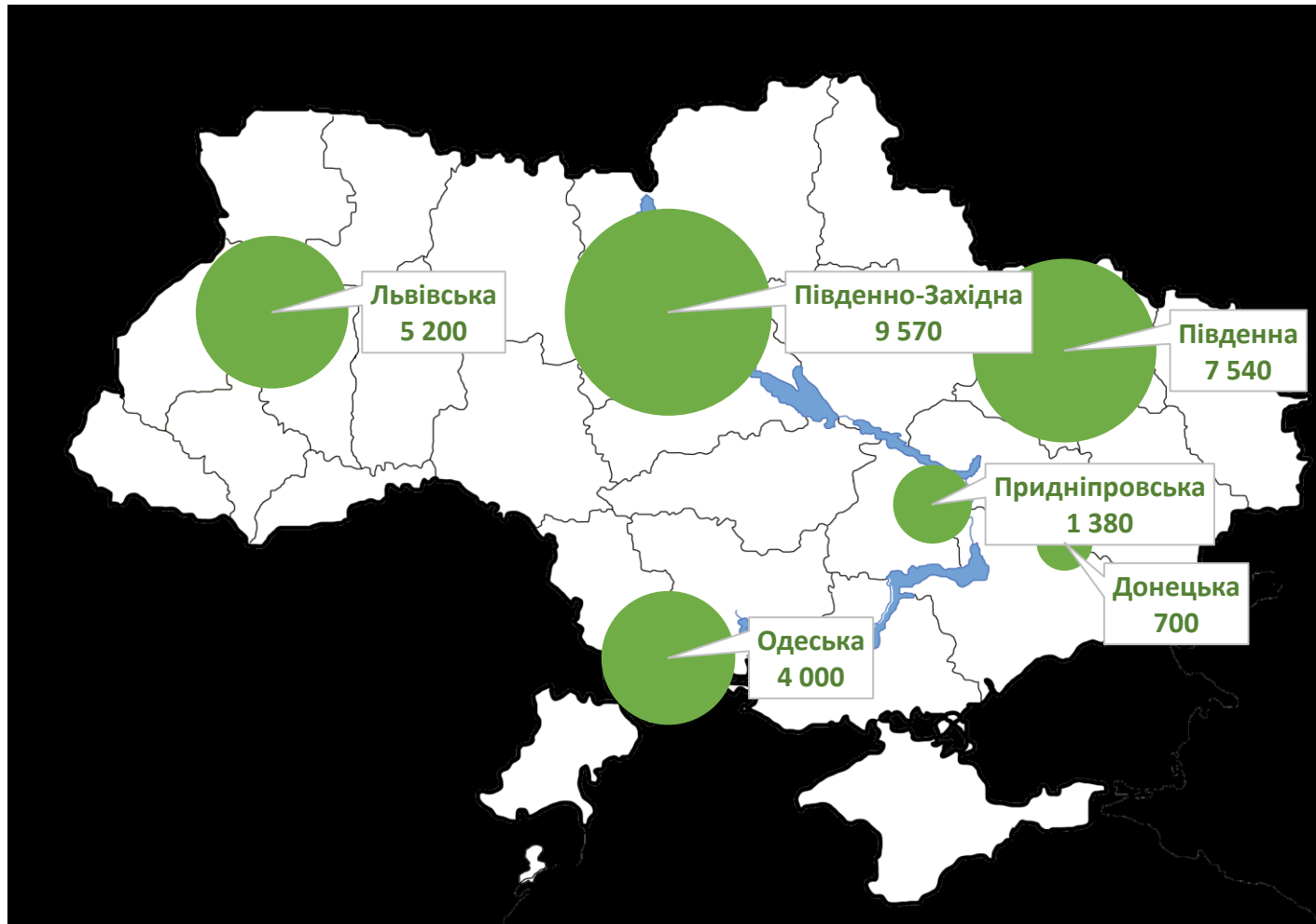


Рисунок А.1 – Картограма зародження вантажопотоку зернових по філіях АТ «Українські залізниці» у 2021 / 2022 маркетинговому році

## Додаток Б

### Складові елементи моделі

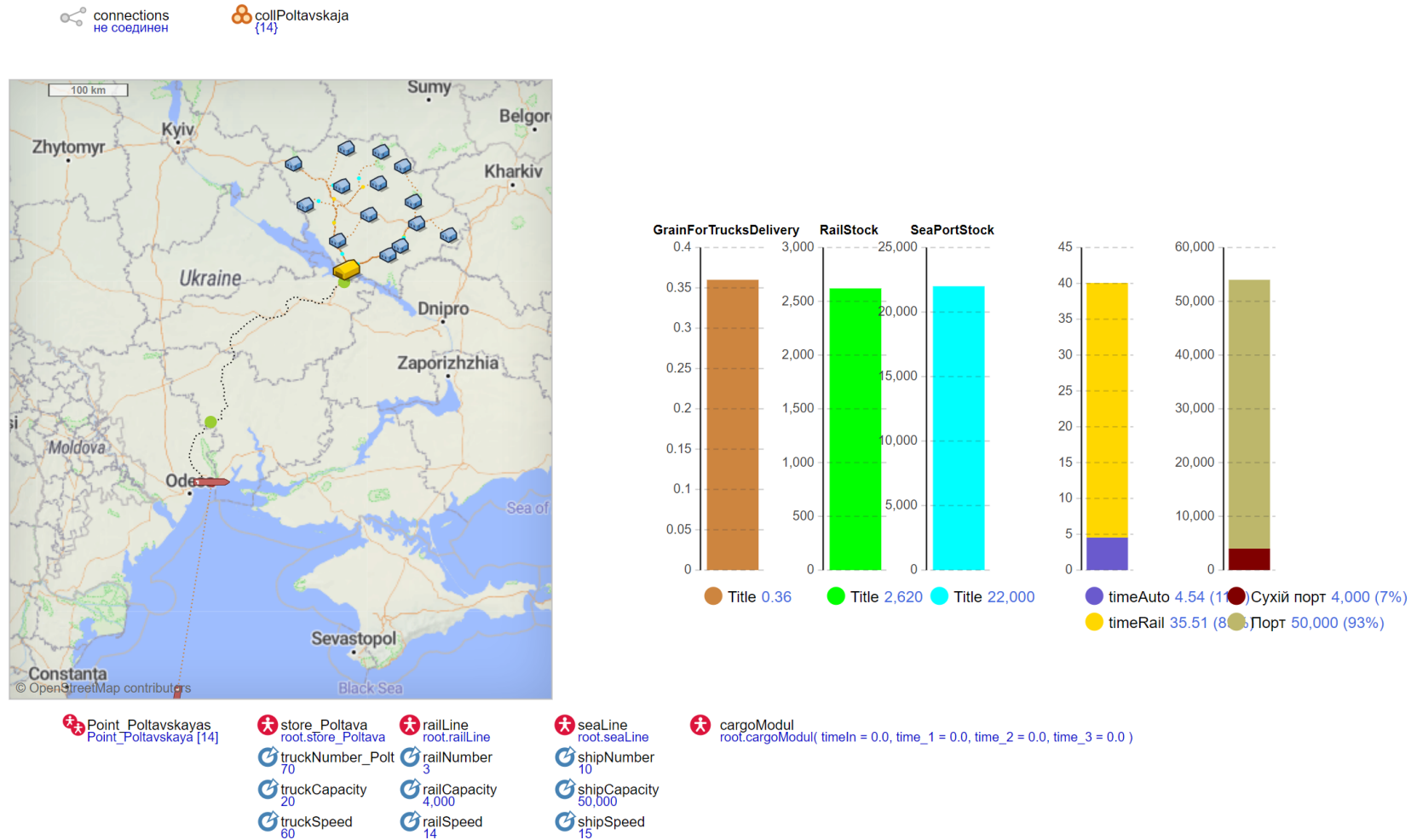


Рисунок Б.1 – Загальний вигляд презентації моделі, елементів управління моделюванням, агентів та діаграм результатів на агентів Main

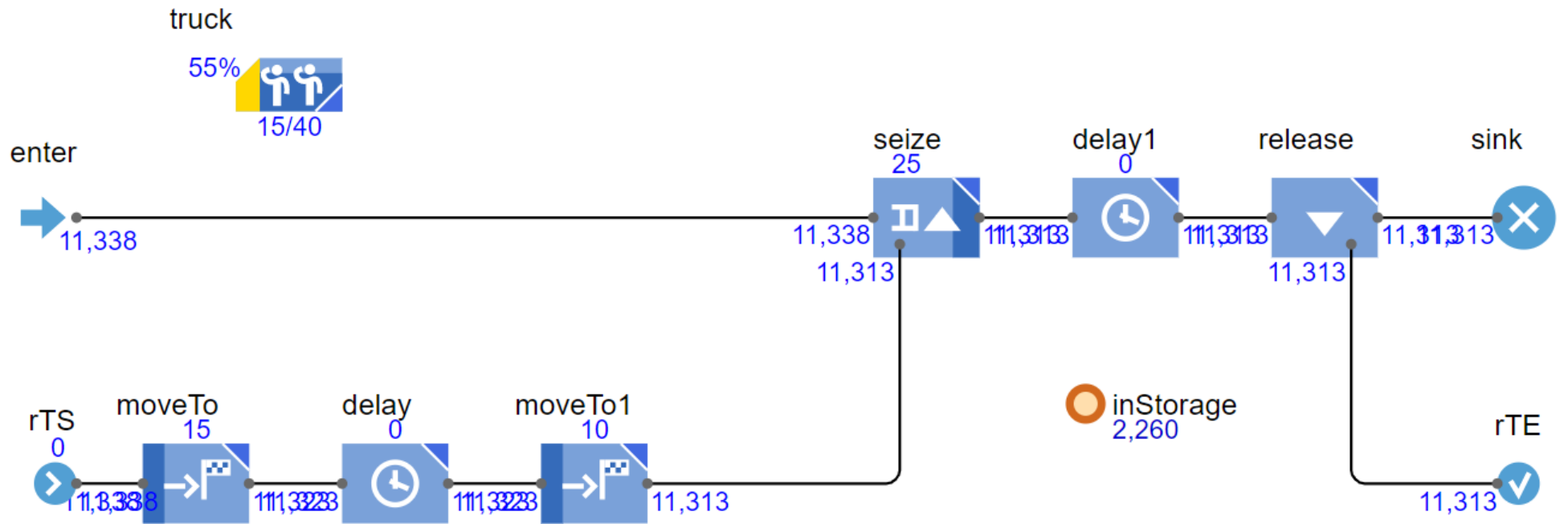


Рисунок Б.2 – Дискретно-подієвий процес агента «Автомобільна лінія»

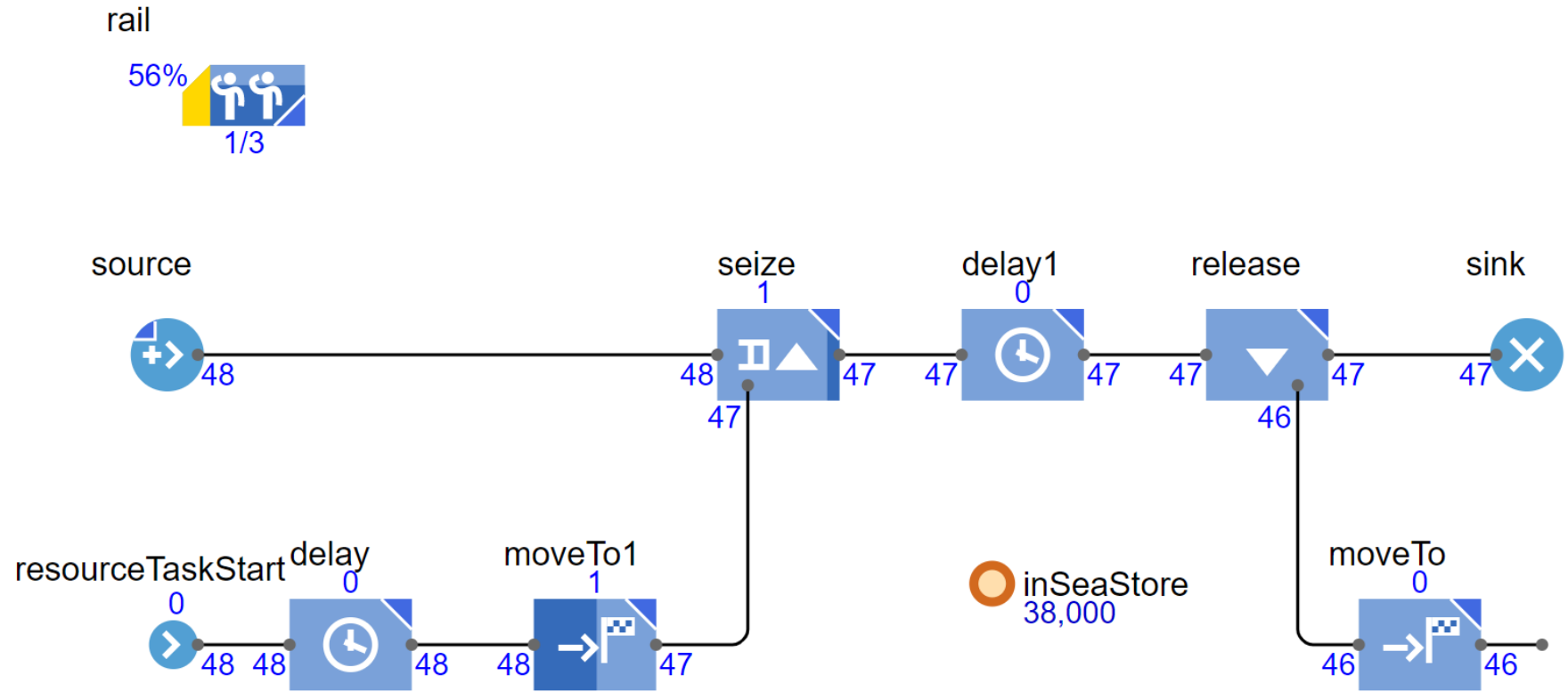


Рисунок Б.3 – Дискретно-подієвий процес агенту «Залізнична лінія»

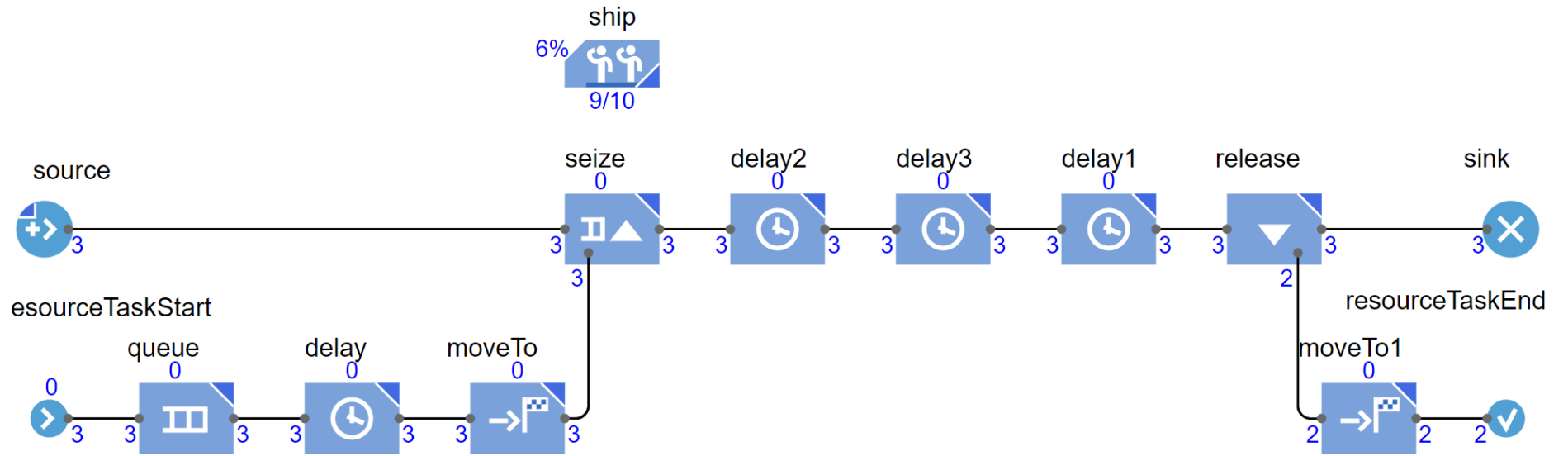


Рисунок Б.4 – Дискретно-подієвий процес агенту «Водна лінія»

## Додаток В

### Налаштування моделі та результати експериментів оптимізації

The screenshot displays the configuration interface for an optimization experiment in AnyLogic University Researcher. The main window is titled "OptimizationVehicles - Optimization Experiment".

**Experiment Settings:**

- Name: OptimizationVehicles
- Top-level agent: Main
- Optimization engine: Genetic
- Objective: minimize (selected)
- Objective function: `root.dataTimeDeliveryToSeaPort.mean()`
- Number of iterations: Fixed (selected), 5000
- Maximum available memory: 16384 Mb

**Parameters Table:**

Parameter	Type	Value			
		Min	Max	Step	Suggested
truckNu...r_Polt	discrete	30	70	1	
truckCapacity	fixed	20			
railNumber	discrete	1	7	1	
railCapacity	fixed	4000			
shipNumber	fixed	1			
shipCapacity	fixed	50000			
truckSpeed	fixed	60			
railSpeed	fixed	35			
shipSpeed	fixed	15			
test	fixed	1			
cargoValue*	fixed	83333			

**Requirements Table:**

Enabled	Expression	Type	Bound
<input checked="" type="checkbox"/>	<code>root.store_Poltava.truck.utilization()</code>	<=	0.75
<input checked="" type="checkbox"/>	<code>root.store_Poltava.truck.utilization()</code>	>=	0.5
<input checked="" type="checkbox"/>	<code>root.railLine.rail.utilization()</code>	<=	0.75
<input checked="" type="checkbox"/>	<code>root.railLine.rail.utilization()</code>	>=	0.5

In the background, a smaller window titled "PhD1\_Grain\_Dnipro\_10012025 : OptimizationVehicles" shows a plot of the optimization process. The plot displays the 'Current' and 'Best' values over iterations, with a red line for 'Current' and a blue line for 'Best'. The plot shows a complex, oscillating path, indicating the search space of the optimization process.

Рисунок В.1 – Вікно налаштування експерименту оптимізації імітаційної моделі в середовищі AnyLogic University

Researcher

	Current	Best
Iterations completed:	42	6
Objective: ↓	326.6	322.626
<b>Parameters</b>	Copy best	
<b>truckNumber_Polt</b>	<b>76</b>	<b>79</b>
truckCapacity	20	20
<b>railNumber</b>	<b>3</b>	<b>3</b>
railCapacity	4,000	4,000
shipNumber	10	10
shipCapacity	50,000	50,000
truckSpeed	60	60
railSpeed	35	35
shipSpeed	15	15
test	1	1
cargoValue	63,111	63,111

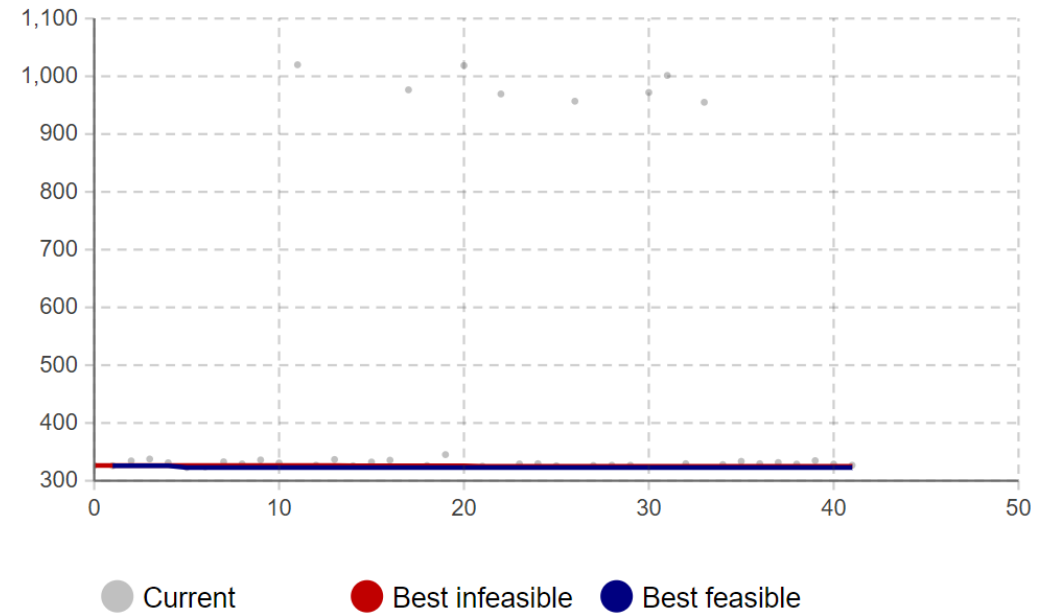


Рисунок В.2 – Результат експерименту 1 оптимізації

	Current	Best
Iterations completed:	53 <i>infeasible</i>	15
Objective: ↓	299.637	<b>292.816</b>
<b>Parameters</b>		<input type="button" value="Copy best"/>
<b>truckNumber_Polt</b>	<b>96</b>	<b>92</b>
truckCapacity	20	20
<b>railNumber</b>	<b>5</b>	<b>4</b>
railCapacity	4,000	4,000
shipNumber	10	10
shipCapacity	50,000	50,000
truckSpeed	60	60
railSpeed	35	35
shipSpeed	15	15
test	1	1
cargoValue	71,429	71,429

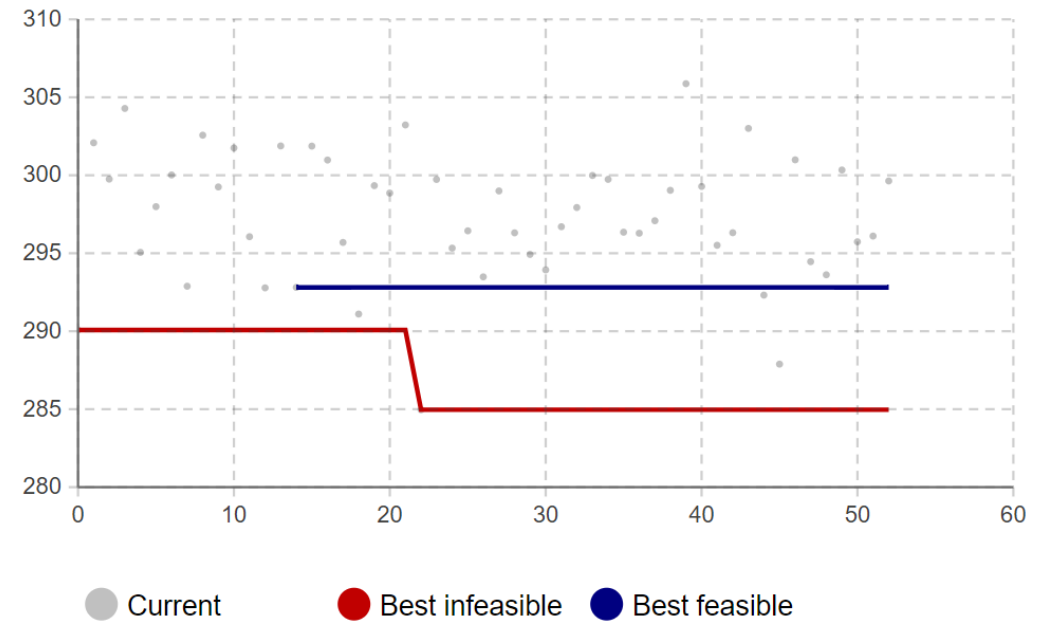


Рисунок В.3 – Результат експерименту 2 оптимізації

	Current	Best
Iterations completed:	97	<b>78</b>
Objective: ↓	228.483	<b>217.823</b>
<b>Parameters</b>		Copy best
<b>truckNumber_Polt</b>	<b>102</b>	<b>106</b>
truckCapacity	20	20
<b>railNumber</b>	<b>5</b>	<b>5</b>
railCapacity	4,000	4,000
shipNumber	10	10
shipCapacity	50,000	50,000
truckSpeed	60	60
railSpeed	35	35
shipSpeed	15	15
test	1	1
cargoValue	107,143	107,143

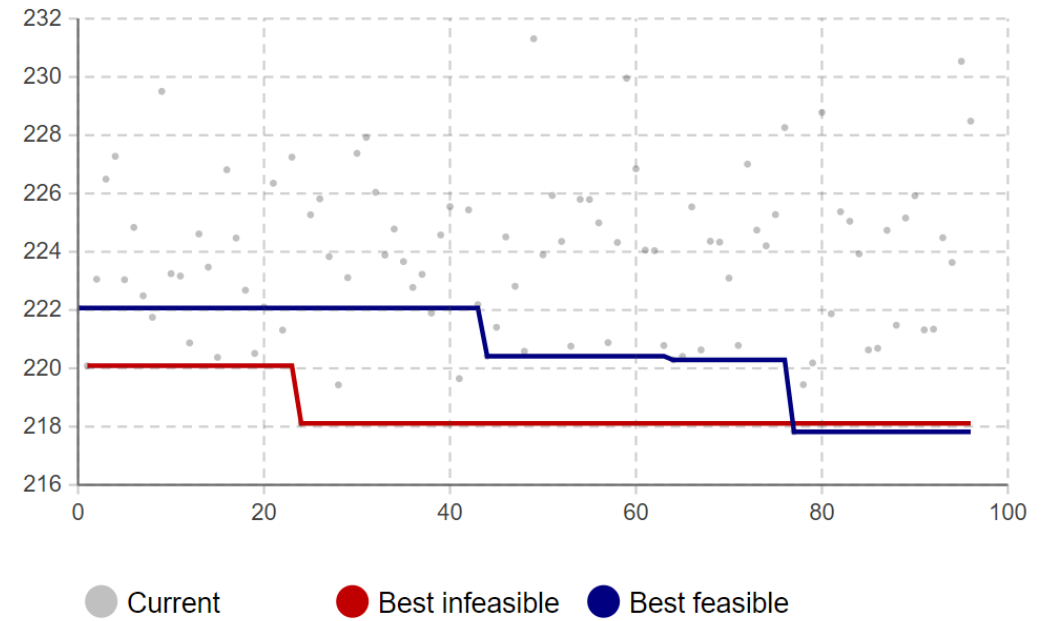


Рисунок В.4 – Результат експерименту з оптимізації

## Додаток Г

Список публікацій здобувача за темою дисертації та відомості про апробацію результатів дисертації

**Публікації у науковому фаховому виданні України категорії «Б»:**

1. Хоменко Ю. Л., Окороків А. М. Дослідження експортних вантажопотоків зернових з України. *Транспортні системи та технології перевезень*. 2023. Вип. 26. С. 85–92. DOI: 10.15802/tstt2023/293358.

2. Khomenko Yu., Matsiuk V., Okorokov A., Gorobchenko O. Development of a simulation model of grain delivery in global supply chains. *Scientific Reports of the National University of Life and Environmental Sciences of Ukraine*. 2024. Vol. 2, № 5. P. 21-35. DOI: 10.31548/dopovidi/5.2024.21.

3. Хоменко Ю. Л. Аналіз ефективності існуючих транспортно-технічних ліній транспортування зернових з України. *Транспортні системи та технології перевезень*. 2025. Вип. 30. С. 79-87. DOI: 10.15802/tstt2025/340140.

**Публікації у фаховому виданні України категорії «А», що включене до міжнародних наукометричних баз Scopus:**

4. Khomenko Yu., Okorokov A., Matsiuk V., Zhuravel I., Pavlenko O. Revealing the causes of delays at transit points along an intermodal grain supply chain. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2025. Vol. 4, № 3 (136). P. 40-50. DOI: 10.15587/1729-4061.2025.338166.

5. Zaruba O., Okorokov A., Vernyhora R., Prokopa O., Khomenko Yu. Assessing the efficiency of centralized use of train formations within an extensive supply network for metallurgical production. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2025. Vol. 5, № 3 (137). P. 48–56. DOI: 10.15587/1729-4061.2025.342416

**Наукові праці, які засвідчують апробацію матеріалів дисертації:**

6. Окороків А. М., Вернигора Р. В., Хоменко Ю. Л. Альтернативні варіанти перевезення аграрної продукції на експорт та їх загальна оцінка. *Збірник тез доповідей наукової конференції професорсько-викладацького складу, аспірантів,*

студентів та співробітників відокремлених структурних підрозділів університету (м. Київ, Україна, 17–19 травня 2023 року). Київ: НТУ, 2023. Вип. 79. С. 341-342.

7. Khomenko Y., Okorokov A., Vernyhora R. Logistics systems for the export of agricultural products of Ukraine in the context of military aggression. *The proceedings of the international scientific-practical conference on «The fourth industrial revolution and innovative technologies»* (м. Гянджа, республіка Азербайджан, 2–3 травня 2023 року). Баку: АТУ, 2023. Ч. 2. С. 309-310.

8. О कोरोков А. М., Вернигора Р. В., Хоменко Ю. Л. Проблеми та ризики при перевезенні зернових через західні кордони України. *Матеріали 82 Міжнародної науково-практичної конференції «Проблеми та перспективи розвитку залізничного транспорту»* (м. Дніпро, Україна, 20–21 квітня 2023 року). Дніпро: УДУНТ, 2023. С. 250-251.

9. Хоменко Ю. Л., О कोरोков А. М. Моделювання процесу доставки зернових у напрямку ЄС. *Тези доповідей міжнародної науково-технічної конференції «Університетська наука – 2024»* (м. Дніпро, Україна, 23-24 травня 2024 року). Дніпро: ДВНЗ «ПДТУ», 2024. Том 1. С. 195-197.

10. Хоменко Ю. Л. Формалізація процесу постачання зернових у глобальних ланцюгах постачання. *Збірник тез доповідей Всеукраїнської науково-технічної конференції студентів і молодих учених «Наука і сталий розвиток транспорту 2024»* (м. Дніпро, Україна, 27 листопада 2024 року). Дніпро: УДУНТ, 2024. С. 55-56.

11. О कोरोков А. М., Хоменко Ю. Л., Medina Carlos Moyses Carranza. Складові системи моделі постачання зернових вантажів на експорт. *Тези 13-ї міжнародної науково-практичної конференції «Перспективи взаємодії залізниць та промислових підприємств»* (м. Дніпро, Україна, 28-29 листопада 2024 року). Дніпро: УДУНТ, 2024. С. 64-65.

12. Хоменко Ю. Л., О कोरोков А. М. Оптимізація параметрів лінії постачання зернових у змішаному сполученні. *Тези доповідей міжнародної науково-технічної конференції «Університетська наука – 2025»* (м. Дніпро, Україна, 15-16 травня 2025 року). Дніпро: ДВНЗ «ПДТУ», 2025. Том 1. С. 173-174.

13. Хоменко Ю. Л., Окорочков А. М. Підвищення ефективності інтермодальних ланцюгів постачання зернових засобами агентної симуляції. *Матеріали 21 науково-практичної міжнародної конференції «Міжнародна транспортна інфраструктура, індустріальні центри та корпоративна логістика» (м. Харків, Україна, 5-6 червня 2025 року)*. Харків: УкрДУЗТ, 2025. С. 169-171.

***Відомості про апробацію результатів дисертації:***

1. 79 наукова конференція професорсько-викладацького складу, аспірантів, студентів та співробітників відокремлених структурних підрозділів Національного транспортного університету (м. Київ, Україна, 2023 рік), (заочна участь).

2. Міжнародна науково-практична конференція «Четверта промислова революція та інноваційні технології» (м. Гянджа, республіка Азербайджан, 2-3 травня 2023 року), (заочна участь).

3. 82 Міжнародна науково-практична конференція «Проблеми та перспективи розвитку залізничного транспорту» (м. Дніпро, Україна, 20-21 квітня 2023 року).

4. Міжнародна науково-технічна конференція «Університетська наука – 2024» (м. Дніпро, Україна, 23-24 травня 2024 року).

5. Всеукраїнська науково-технічна конференції студентів і молодих учених «Наука і сталий розвиток транспорту 2024» (м. Дніпро, Україна, 27 листопада 2024 року).

6. Міжнародна науково-практична конференція «Перспективи взаємодії залізниць та промислових підприємств» (м. Дніпро, Україна, 28-29 листопада 2024 року).

7. Міжнародна науково-технічна конференція «Університетська наука – 2025» (м. Дніпро, Україна, 15-16 травня 2025 року).

8. 21 науково-практична міжнародна конференція «Міжнародна транспортна інфраструктура, індустріальні центри та корпоративна логістика» (м. Харків, Україна, 5-6 червня 2025 року), (заочна участь).

## Додаток Д

## Акти впровадження результатів дисертаційної роботи

## ЗАТВЕРДЖУЮ

Заступник начальника Центру  
управління рухом  
АТ «Укрзалізниця»  
Дмитро ДЯДЮШКІН  
«УПР»/ЛНН/ 202\_\_р.  
РУХОМ

## АКТ

**про впровадження розробки, що виконана аспірантом Українського державного університету науки і технологій (УДУНТ) Хоменком Юрієм Леонідовичем з підвищення ефективності перевезення зернових у змішаному сполученні**

У період з 15 квітня 2025 р по 12 грудня 2025 року проведено роботу з впровадження та визначення ефективності результатів наукової роботи з удосконалення системи перевезення зернових вантажів на полігоні, що відноситься до регіональної філії «Придніпровська залізниця».

Встановлено наступне:

1. На підставі аналізу одержаних в результаті дослідження даних та показників експлуатаційної роботи рекомендовано до впровадження імітаційну модель процесу постачання зернових у єдиній автомобільно-залізнично-водній транспортно-технологічній системі, з метою поліпшення планування використання рухомого складу.

2. Планування використання рухомого складу залізничного транспорту за допомогою запропонованої моделі дозволяє уникнути надлишкових пробігів, покращити показники використання тягового рухомого складу та зменшити витрати на виконання робіт.

3. Розробка виконана відповідно до пріоритетних напрямків розвитку залізничного транспорту України, з урахуванням складних умов провадження військового стану, основні результати пропонуються до впровадження.

Заступник начальника Київського Центру  
управління рухом Центру управління рухом  
АТ «Укрзалізниця»



Артем ХОДОС

**ЗАТВЕРДЖУЮ**

Перший проректор Українського  
державного університету науки і  
технологій,

д.т.н., професор

Анатолій РАДКЕВИЧ



» 03 2026 р.

**АКТ**

**про впровадження результатів дисертації Хоменка Юрія Леонідовича у  
навчальному процесі факультету «Управління процесами перевезень»  
Українського державного університету науки і технологій**

До основних результатів дисертаційної роботи Хоменка Ю. Л., які використовуються у навчальному процесі факультету «Управління процесами перевезень» Українського державного університету науки і технологій, належать:

- аналіз даних щодо обсягів перевезень зернових вантажів, місць зародження та погашення відповідних вантажопотоків, що дозволяє вивчити стан транспортної системи та технології просування вантажопотоків до морських портів;
- метод нормування парку транспортних засобів у складному автомобільно-залізнично-водному ланцюзі постачання зернових, що дозволяє прогнозувати потребу у залізничному рухомому складі, парку поїзних локомотивів, елеваторних та перевантажувальних потужностях;
- багатокритеріальна оптимізаційна математична модель постачання зернових у межах єдиної автомобільно-залізнично-водної транспортно-технологічної системи, яка дозволяє розрахувати раціональні параметри роботи транспортної системи на обраному напрямку;
- доопрацьована імітаційна модель процесу постачання зернових у єдиній автомобільно-залізнично-водній транспортно-технологічній системі на базі

програмного комплексу AnyLogic Research Edition, на базі якої проводяться дослідження функціонування різних видів транспорту та роботи пунктів їх взаємодії.

Дані розробки з 2024 року використовуються:

1. При проведенні занять з дисципліни «Міжнародні транспортні коридори та технології перевезень», у студентів другого (магістерського) рівня вищої освіти, що навчаються за спеціальностями J7 «Залізничний транспорт» та J8 «Автомобільний транспорт».

2. При проведенні лабораторних робіт з дисципліни «Моделювання складних транспортних процесів та систем», у студентів другого (магістерського) рівня вищої освіти, що навчаються за освітньою програмою «Логістика та ризик-кризове управління на транспорті» спеціальності J7 «Залізничний транспорт».

3. При виконанні випускних кваліфікаційних робіт бакалаврів та магістрів, що навчаються за спеціальностями J7 «Залізничний транспорт» та J8 «Автомобільний транспорт».

Декан факультету  
«Управління процесами перевезень»,  
Українського державного  
університету науки і технологій,  
к.т.н., професор



Роман ВЕРНИГОРА