

Міністерства освіти і науки України
Харківський національний автомобільно-дорожній університет

Кваліфікаційна
наукова
праця на правах
рукопису

Севідова Вікторія Віталіївна

УДК 656.073

ДИСЕРТАЦІЯ

ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ДОСТАВКИ ВАНТАЖІВ В МІЖНАРОДНОМУ СПОЛУЧЕННІ В УМОВАХ ДІДЖИТАЛІЗАЦІЇ

275 - Транспортні технології (за видами)

27 - Транспорт

Подається на здобуття наукового ступеня доктора філософії

Дисертація містить результати власних досліджень.

Використання ідей, результатів і текстів інших
авторів мають посилання на відповідні джерела

 В.В. Севідова

Науковий керівник Калініченко Олександр Петрович, к.т.н., доцент

Харків – 2025

АНОТАЦІЯ

Севідова В.В. Підвищення ефективності доставки вантажів в міжнародному сполученні в умовах діджиталізації. – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора філософії за спеціальністю 275.03 «Транспортні технології (на автомобільному транспорті)». – Харківський національний автомобільно-дорожній університет, МОН України, Харків, 2025.

Дослідження присвячено розвитку теоретичних і методичних засад організації міжнародних автомобільних перевезень шляхом формування комплексного підходу до вибору раціональної транспортно-технологічної схеми доставки вантажів за умов цифрової трансформації логістичної галузі та суттєвого зростання зовнішніх ризиків, зокрема військового характеру. Міжнародні вантажні перевезення в умовах сучасної економіки характеризуються високим рівнем невизначеності, багатоступеневою структурою логістичних процесів, залежністю від діджиталізованих потоків даних та необхідністю адаптації до порушених ланцюгів постачання внаслідок військових дій на території України. Саме тому актуальним є створення моделей і методів, здатних враховувати стохастичну природу операцій, ризики геополітичної нестабільності та необхідність оперативного перегляду рішень щодо маршрутизації та організації доставки.

У дисертації проведено систематизацію наукових джерел щодо різних підходів до організації міжнародної автомобільної логістики, проаналізовано ефективність традиційних та цифрових моделей управління транспортними потоками, вивчено технологію крос-докінгу як інструмент прискорення доставки та зменшення витрат при обробці дрібнопартійних вантажів. Встановлено, що сучасні виклики вимагають переходу від статичних та детермінованих моделей до динамічних, адаптивних та ризик-орієнтованих, здатних враховувати як операційні параметри перевезень, так і зовнішні

загрози, що впливають на стійкість логістичних коридорів.

Одним із ключових результатів дослідження є формування методичного підходу до вибору раціональної транспортно-технологічної схеми доставки, який базується на декомпозиції логістичного процесу на окремі операції, математичному описі їх витрат і тривалості, а також інтеграції цифрових інструментів. Запропонований підхід дозволяє оцінювати чотири альтернативні схеми доставки за сукупністю показників.

Особливе місце у роботі займає введення до структури витрат спеціальної складової – «військовий ризик», який вперше у вітчизняних дослідженнях запропоновано оцінювати не через статичні середні показники по країні, а шляхом динамічної топологічної оцінки небезпеки. Такий підхід передбачає використання «теплових мап» інцидентів, сформованих на основі відкритих даних та інформаційних платформ аналізу загроз, що дозволяє визначати просторову конфігурацію небезпечних зон у режимі реального часу. Розроблена модель дозволяє кількісно оцінювати ймовірність ураження транспортного засобу з урахуванням відстані маршруту до лінії фронту, критичної інфраструктури, районів підвищеної інтенсивності обстрілів та повітряних загроз.

У роботі побудовано математичну модель узгодженого виконання операцій крос-докінгу, що враховує обмеженість ресурсів – доків, персоналу, техніки та стохастичність прибуття транспортних засобів. Запропоновано використовувати поняття робастності для оцінки чутливості спільного операційного графіка до зміни зовнішніх умов, що дозволяє визначити оптимальну робочу зону для ключових параметрів моделі. Застосування симуляційних інструментів дало змогу оцінити вплив нестабільності процесів на загальний час обробки вантажів і формування затримок.

В роботі наведено результати експериментальних досліджень та апробації розроблених моделей. Експериментально підтверджено існування нелінійної U-подібної залежності між рівнем завантаження ресурсів терміналу та загальними витратами. Встановлено, що економічний оптимум

досягається не при максимальному завантаженні, а в «оптимальній робочій зоні», яка забезпечує необхідний рівень робастності системи до випадкових збурень. Доведено, що ігнорування резервів часу призводить до експоненційного зростання витрат через ефект «доміно».

Проведено порівняльний аналіз ефективності схем доставки методом попарного порівняння, який виявив чітку залежність вибору оптимальної схеми від масштабу підприємства. Для малих підприємств найбільш ефективною визначено схему з консолідацією в країні відправлення (зниження витрат до 16,6 % порівняно з прямою доставкою). Для середніх та великих підприємств оптимальною є схема з деконсолідацією в країні призначення (економія до 11,9 %), що дозволяє оптимізувати доставку «останньої милі».

Розроблено адаптивну матрицю прийняття рішень для оперативного управління, яка пов'язує рівень стохастичності зовнішнього середовища (режими «Зелений», «Жовтий», «Червоний») з цільовими показниками завантаження системи, що дозволяє мінімізувати ризики зриву поставок.

Наукова новизна дисертаційної роботи полягає у розробці нових та вдосконаленні існуючих методів, моделей та систем підтримки прийняття рішень в управлінні міжнародними автомобільними перевезеннями, що дозволяє підвищити їх ефективність в умовах цифрової трансформації та підвищених ризиків.

Вперше для методичного підходу до вибору раціональної транспортно-технологічної схеми запропоновано використання специфічної геополітичної складової «військовий ризик», шляхом її інтеграції до комплексної цільової функції мінімізації загальних витрат.

Набула подальшого розвитку математична модель оптимізації крос-докінгових операцій, яка, на відміну від відомих, дозволяє комплексно вирішувати задачу розподілу транспортних засобів та вибору сценаріїв їх обслуговування з урахуванням обмежених ресурсів та часових вікон.

Удосконалено метод управління робастністю операційних графіків,

який, на відміну від традиційного ситуативного реагування на операційні відхилення, базується на проактивному управлінні пропускну здатністю. Метод дозволяє за допомогою імітаційного моделювання визначити «оптимальну робочу зону» рівня завантаження ресурсів та забезпечує формування адаптивної стратегії планування, що передбачає динамічне коригування цільового завантаження залежно від прогнозованого ступеня невизначеності зовнішнього середовища.

Практичне значення результатів дослідження полягає у розробці комплексу взаємопов'язаних методів, моделей та програмних інструментів («LogisticsSim», «Симулятор Крос-Докінгу», система підтримки прийняття рішень для побудови спільних операційних графіків), що слугують для підтримки прийняття рішень на стратегічному, тактичному та операційному рівнях управління міжнародними перевезеннями. Застосування розробленого інструментарію дозволяє логістичним компаніям проводити детальний аналіз альтернативних сценаріїв доставки з урахуванням сучасних ризиків, виявляти «вузькі місця» в роботі терміналів та оптимізувати їх ресурсні конфігурації. Методичні підходи та практичні рекомендації, розроблені в дисертації, надають науково обґрунтовану базу для вибору оптимальної архітектури логістичної мережі залежно від розміру діяльності підприємства, яка підтверджує доцільність консолідації для малих компаній та деконсолідації для середніх і великих. Впровадження запропонованої адаптивної політики управління, що базується на концепції «оптимальної робочої зони», дозволяє оперативно коригувати логістичні процеси відповідно до рівня стохастичності середовища, підвищуючи ефективність доставки вантажів при одночасному зниженні загальних витрат.

Результати дослідження впроваджено у діяльність логістичних підприємств, що підтверджено актами впровадження, а також використано у навчальному процесі ХНАДУ при викладанні дисциплін транспортно-логістичного спрямування.

Ключові слова: міжнародні перевезення, вантаж, доставка, прийняття

рішень, термінал, крос-докінг, логістична схема, оптимізація, витрати, ланцюг поставок, експеримент.

Список публікацій здобувача.

Наукові праці, в яких опубліковані основні наукові результати дисертації:

1) Севідова В.В., Сальніков Є.К., Калініченко О.П. Застосування діджитал-технологій при доставці вантажу в міжнародному сполученні // *Комунальне господарство міст*. 2023. Т. 3, № 177. С. 200–205. URL: <https://doi.org/10.33042/2522-1809-2023-3-177-200-205>

2) Kalinichenko, O., Pavlenko, O., Nagorny, Y., Sevidova, V., Soldatenko, I. Determination of Conditions to Provide Transport Logistics Support Service to Aircraft at Aerodromes in Ukraine. *STUE 2023. Lecture Notes in Networks and Systems, vol 807*. Springer, Cham 2023. URL: https://doi.org/10.1007/978-3-031-46874-2_34

3) Калініченко О.П., Черпаха О.С., Севідова В.В., Сальніков Є.К. Удосконалення технологічного процесу доставки швидкопсувних вантажів у місті Харків // *Комунальне господарство міст*. 2024. Т. 4, № 185. С. 275–281. URL: <https://doi.org/10.33042/2522-1809-2024-4-185-275-281>

4) Севідова В.В., Калініченко О.П. Удосконалення технології роботи складу при міжнародних вантажних перевезеннях // *Комунальне господарство міст*. 2024. Т. 6, № 187. С. 302–307. URL: <https://doi.org/10.33042/2522-1809-2024-6-187-302-307>

5) Севідова В.В., Калініченко О.П. Визначення кількості транспортних засобів при крос-докінгу в умовах невизначеності та обмеженості ресурсів // *Комунальне господарство міст*. 2025. Т. 1, № 189. С. 475–481. URL: <https://doi.org/10.33042/2522-1809-2025-1-189-475-481>

6) Калініченко О.П., Севідова В.В. Підвищення ефективності операцій крос-докінгу для міжнародних автомобільних перевезень на основі розроблення спільних операційних графіків // *Збірник наукових праць*

Українського державного університету залізничного транспорту. 2025 № 212. С. 331-341. URL: <https://doi.org/10.18664/1994-7852.212.2025.336554>

Наукові праці, які засвідчують апробацію матеріалів дисертації:

1. Севідова В.В., Калініченко О.П. Застосування цифрових технологій при міжнародних перевезеннях вантажів // *Комп'ютерно-інтегровані технології автоматизації технологічних процесів на транспорті та у виробництві*: матеріали Всеукр. наук.-практ. конф. здобувачів вищої освіти і молодих учених. Харків : ХНАДУ, 2021. С. 179–183.
2. Sevidova V. V., Voronova E. M. The challenges of organising international transport // *Питання сучасної модернізації науки та освіти – 2022*: збірник наукових статей Ч.1. ХНАДУ. Харків: ХНАДУ, 2022 р. С. 21 – 23
3. Sevidova V. V, Voronova E. M. Kalinichenko A. P. Applying digital technology to international transport of goods // *The 5 th International scientific and practical conference «Science, innovations and education: problems and prospects»* (December 8-10, 2021) CPN Publishing Group, Tokyo, Japan. 2021. P. 302 – 306
4. Калініченко О.П., Севідова В.В. Цифровізація міжнародних вантажних перевезень // *Матеріали до 77-ї наукової конференції професорсько-викладацького складу, аспірантів, студентів та співробітників відокремлених структурних підрозділів університету*. Київ, НТУ. 2021
5. Калініченко О.П., Севідова В.В. Проблеми організації міжнародних автомобільних перевезень // *Матеріали до 77-ї наукової конференції професорсько-викладацького складу, аспірантів, студентів та співробітників відокремлених структурних підрозділів університету*. Київ, НТУ. 2021
6. Севідова В.В., Калініченко О.П. Вплив діджитал технологій на міжнародні перевезення // *Збірник тез доповідей 79-ої Наукової конференції професорсько-викладацького складу, аспірантів, студентів та*

співробітників відокремлених структурних підрозділів університету збірник тез доповідей. Київ: НТУ, 2023. Вип. 79

7. Калініченко, О. П. Критерії вибору раціонального методу організації міжнародних автомобільних перевезень вантажів на засадах діджиталізації // *Збірник матеріалів 87-ї міжнародної науково-технічної та науково-методичної конференції університету. Секція транспортних технологій*, м. Харків, 10–13 трав. 2023 р. / Харків. нац. автомоб.-дор. ун-т. – Харків : ХНАДУ, 2023 – С. 12 – 14

8. Севідова В. В., Калініченко О. П. Підвищення ефективності перевезень вантажів автомобільним транспортом в міжнародному сполученні // *Напрями розвитку технологічної системи логістики в АПВ: зб. матер. IV Міжнар. наук.-практ. інтернет-конф.*, 20 квітня 2023 р. Харків: ДБТУ, 2023. С. 72 – 75

9. В. В. Севідова, О. П. Калініченко, Y. Aloszynskyi, Особливості організації міжнародних автомобільних перевезень вантажів // *Розумний транспорт та інтегровані транспортні технології: зб. матеріалів наук. робіт з міжнар. наук.-практ. конф.*, 21–22 листоп. 2023 р., м. Харків / М-во освіти і науки України, Харків. нац. автомоб.-дор. ун-т. – Харків : ХНАДУ, 2023 – С. 76 – 78

10. Kalinichenko O., Pavlenko O., Sevidova V. Determination of Conditions to Provide Transport Logistics Support Service to Aircraft at Aerodromes in Ukraine // *Збірник матеріалів Міжнародної науково-технічної конференції «Розумний транспорт та інтегровані транспортні технології»*, Х:ХНАДУ, 2023 р. 3с

11. Sevidova V. V, Salnikov Ye.K Kalinichenko O. P. The impact of digitalization on freight transportation // *«Topical aspects of modern scientific research»*: materials of conference (March 21-23, 2024) CPN Publishing Group, Tokyo, Japan. 2024, P.114 – 118

12. В. В. Севідова, О. П. Калініченко. Впровадження інновацій в області міжнародних перевезень у світі // *Сучасні проблеми функціонування*

логістичних систем. Сталий розвиток транспортних систем: наука і практика : зб. тез доп. міжнар. наук.-практ. конф., 25–26 листоп. 2024 р. / Харків. нац. автомоб.-дор. ун-т. – Харків, 2024. – С. 201–204

13. Sevidova V.V., Kalinichenko O.P. The role of digitalization in international cargo transportation // *Інтелектуальні транспортні технології: Тези доповідей 25 –27 листопада 2024 р. Харків: УкрДУЗТ, 2024 С. 177–178*

ABSTRACT

Sevidova V.V. Improving the efficiency of cargo delivery in international transportation under digitalization conditions. – Qualifying scientific work on the rights of the manuscript.

Thesis for obtaining the degree of doctor of philosophy in the specialty 275.03 «Transport Technologies (in Road Transport)». – Kharkiv National Automobile and Highway University, Ministry of Education and Science of Ukraine, Kharkiv, 2025.

The research is dedicated to the development of theoretical and methodological foundations for the organization of international road freight transport by forming a comprehensive approach to the selection of a rational transport-technological scheme for cargo delivery under the conditions of the digital transformation of the logistics industry and a significant increase in external risks, particularly of a military nature. International freight transport in the modern economy is characterized by a high level of uncertainty, a multi-stage structure of logistics processes, dependence on digitized data flows, and the need to adapt to supply chains disrupted by military actions on the territory of Ukraine. Therefore, it is urgent to create models and methods capable of accounting for the stochastic nature of operations, risks of geopolitical instability, and the need for prompt revision of decisions regarding routing and delivery organization.

The dissertation systematizes scientific sources regarding various approaches to the organization of international automotive logistics, analyzes the

effectiveness of traditional and digital traffic management models, and studies cross-docking technology as a tool for accelerating delivery and reducing costs when processing small-batch cargoes. It has been established that modern challenges require a transition from static and deterministic models to dynamic, adaptive, and risk-oriented ones capable of considering both operational transport parameters and external threats affecting the stability of logistics corridors.

One of the key results of the study is the formation of a methodological approach to the selection of a rational transport-technological delivery scheme, which is based on the decomposition of the logistics process into separate operations, the mathematical description of their costs and duration, as well as the integration of digital tools. The proposed approach allows for the assessment of four alternative delivery schemes based on a set of indicators.

A special place in the work is occupied by the introduction of a special component into the cost structure – «military risk», which, for the first time in domestic research, is proposed to be assessed not through static average indicators for the country, but through a dynamic topological hazard assessment. This approach involves the use of «heat maps» of incidents formed on the basis of open data and information platforms for threat analysis, which allows determining the spatial configuration of dangerous zones in real-time. The developed model allows assessing the probability of vehicle damage depending on the proximity of the route to the front line, critical infrastructure, areas of high shelling intensity, and aerial threats.

The paper constructs a mathematical model for the coordinated execution of cross-docking operations, taking into account limited resources – docks, personnel, equipment – and the stochastic nature of vehicle arrivals. It is proposed to use the concept of robustness to assess the sensitivity of the joint operational schedule to changes in external conditions, which allows determining the optimal operating zone for key model parameters. The use of simulation tools made it possible to assess the impact of process instability on the total cargo processing time and the formation of delays.

The work presents the results of experimental studies and the approbation of the developed models. The existence of a non-linear U-shaped dependence between the level of terminal resource utilization and total costs was experimentally confirmed. It was established that the economic optimum is achieved not at maximum load, but in the «optimal operating zone», which ensures the necessary level of system robustness to random disturbances. It is proven that ignoring time reserves leads to an exponential increase in costs due to the «domino effect».

A comparative analysis of the efficiency of delivery schemes was conducted using the pairwise comparison method, which revealed a clear dependence of the choice of the optimal scheme on the scale of the enterprise. For small cargo flows, the scheme with consolidation in the country of departure was determined to be the most effective (reducing costs by up to 16,6 % compared to direct delivery). For medium and large enterprises, the optimal scheme is deconsolidation in the country of destination (savings of up to 11,9 %), which allows optimizing «last mile» delivery.

An adaptive decision-making matrix for operational management has been developed, which links the level of environmental stochasticity («Green», «Yellow», «Red» modes) with target system load indicators, allowing for the minimization of risks of delivery failure.

The scientific novelty of the dissertation lies in the development of new and improvement of existing methods, models, and decision support systems in the management of international road transport, which allows increasing their efficiency under conditions of digital transformation and elevated risks.

For the first time, for the methodological approach to selecting a rational transport-technological scheme, the use of a specific geopolitical component «military risk» is proposed by integrating it into the complex objective function of minimizing total costs.

The mathematical model for optimizing cross-docking operations has been further developed, which, unlike known ones, allows comprehensively solving the

problem of distributing vehicles and choosing scenarios for their servicing, taking into account limited resources and time windows.

The method of managing the robustness of operational schedules has been improved, which, unlike the traditional situational response to operational deviations, is based on proactive capacity management. The method allows using simulation modeling to determine the «optimal operating zone» of the resource load level and implement an adaptive planning strategy that provides for a dynamic change in the target load depending on the predicted degree of environmental uncertainty.

The practical value of the research results lies in the development of a complex of interconnected methods, models, and software tools («LogisticsSim», «Cross-Docking Simulator», a decision support system for building joint operational schedules), which serve to support decision-making at strategic, tactical, and operational levels of international transport management. The application of the developed toolkit allows logistics companies to conduct a detailed analysis of alternative delivery scenarios taking into account modern risks, identify «bottlenecks» in terminal operations, and optimize their resource configurations. The methodological approaches and practical recommendations developed in the dissertation provide a scientifically grounded basis for choosing the optimal architecture of the logistics network depending on the size of the enterprise's activity, confirming the feasibility of consolidation for small companies and deconsolidation for medium and large ones. The implementation of the proposed adaptive management policy, based on the concept of an «optimal operating zone», allows for the prompt adjustment of logistics processes according to the level of environmental stochasticity, increasing the efficiency of cargo delivery while reducing total costs.

The results of the study have been implemented in the activities of logistics enterprises, which is confirmed by implementation acts, and are also used in the educational process at KhNAHU (Kharkiv National Automobile and Highway University) when teaching transport and logistics disciplines.

Keywords: international transportation, cargo, delivery, decision-making, terminal, cross-docking, logistics scheme, optimization, costs, supply chain, experiment.

List of candidate's publications

Scientific works in which the main scientific results of the dissertation are published:

1. Sevidova V., Salnikov Y., Kalinichenko O. Application of digital technologies in the delivery of cargo in international traffic. *Municipal economy of cities*. 2023. Vol. 3, no. 177. P. 200–205 .
2. Kalinichenko, O., Pavlenko, O., Nagornyy, Y., Sevidova, V., Soldatenko, I. (2023). Determination of Conditions to Provide Transport Logistics Support Service to Aircraft at Aerodromes in Ukraine. STUE 2023. *Lecture Notes in Networks and Systems*, vol 807. Springer, Cham .
3. Improvement of the technological process of perishable goods delivery in the city of kharkiv / O. Kalinichenko et al. *Municipal economy of cities*. 2024. Vol. 4, no. 185. P. 275–281 .
4. Kalinichenko O., Sevidova V. Improvement of warehouse technology in international freight transportation. *Municipal economy of cities*. 2024. Vol. 6, no. 187. P. 302–307 .
5. Kalinichenko O., Sevidova V. Determining the number of vehicles for cross-docking in conditions of uncertainty and limited resources. *Municipal economy of cities*. 2025. Vol. 1, no. 189. P. 475–481 .
6. Kalinichenko O., Sevidova V. Improving the efficiency of cross-docking operations in international road transportation based on the development of joint operational schedules. *Collection of Scientific Works of the Ukrainian State University of Railway Transport*. 2025. No. 212. P. 331–341 .

Scientific works that certify the approbation of the dissertation materials:

1. Sevidova V.V., Kalinichenko O.P. Application of digital technologies in international freight transport. *Materials of the All-Ukrainian scientific-practical conference of higher education applicants and young scientists "Computer-*

integrated technologies for automation of technological processes in transport and production", Kharkiv, KhNAHU. 2021. P. 179-183 .

2. Sevidova V. V., Voronova E. M. The challenges of organising international transport. *Issues of modern modernization of science and education–2022: collection of scientific articles Part 1*. KhNAHU. – Kharkiv: KhNAHU, 2022. – P. 21-23 .

3. Sevidova V. V, Voronova E. M. Kalinichenko A. P. Applying digital technology to international transport of goods. *The 5th International scientific and practical conference «Science, innovations and education: problems and prospects»* (December 8-10, 2021) CPN Publishing Group, Tokyo, Japan. 2021. P. 302-306 .

4. Kalinichenko O.P., Sevidova V.V. Digitalization of international freight transport. *Materials for the 77th scientific conference of the faculty, postgraduate students, students and employees of separate structural subdivisions of the university*. Kyiv, NTU. 2021 .

5. Kalinichenko O.P., Sevidova V.V. Problems of organizing international road transport. *Materials for the 77th scientific conference of the faculty, postgraduate students, students and employees of separate structural subdivisions of the university*. Kyiv, NTU. 2021 .

6. Sevidova V.V., Kalinichenko O.P. The impact of digital technologies on international transport. *Collection of abstracts of the 79th Scientific conference of the faculty, postgraduate students, students and employees of separate structural subdivisions of the university*. Kyiv: NTU, 2023. Iss. 79 .

7. Kalinichenko, O. P. Criteria for choosing a rational method of organizing international road freight transport on the basis of digitalization / *Collection of materials of the 87th international scientific-technical and scientific-methodical conference of the university. Section of transport technologies*, Kharkiv, May 10–13, 2023 / Kharkiv National Automobile and Highway University. – Kharkiv: KhNAHU, 2023. – P. 12–14.3 .

8. Sevidova V. V., Kalinichenko O. P. Improving the efficiency of freight transport by road in international traffic. *Directions of development of the technological system of logistics in AIC: collection of materials of the IV International scientific-practical internet conference*, April 20, 2023. Kharkiv: SBTU, 2023. P. 72-75 .
9. V. V. Sevidova, O. P. Kalinichenko, Y. Alosynskyi, Features of organizing international road freight transport // *Smart transport and integrated transport technologies: collection of materials of scientific works from the international scientific-practical conference*, November 21–22, 2023, Kharkiv / Ministry of Education and Science of Ukraine, Kharkiv National Automobile and Highway University. – Kharkiv: KhNAHU, 2023 – P. 76–78 .
10. Determination of Conditions to Provide Transport Logistics Support Service to Aircraft at Aerodromes in Ukraine O. Kalinichenko, O. Pavlenko, V. Sevidova *Collection of materials of the International scientific-technical conference "Smart transport and integrated transport technologies"*, Kh:KhNAHU, 2023. 3p .
11. Sevidova V. V., Salnikov Ye.K Kalinichenko O. P. The impact of digitalization on freight transportation. «*Topical aspects of modern scientific research*» (March 21-23, 2024) CPN Publishing Group, Tokyo, Japan. 2024, P.114-118 .
12. V. V. Sevidova, O. P. Kalinichenko. Introduction of innovations in the field of international transport in the world // *Modern problems of functioning of logistics systems. Sustainable development of transport systems: science and practice: collection of abstracts of the international scientific-practical conference*, November 25–26, 2024 / Kharkiv National Automobile and Highway University. – Kharkiv, 2024. – P. 201–204 .
13. Sevidova V.V., Kalinichenko O.P. The role of digitalization in international cargo transportation. *Intellectual transport technologies, November 25–27, 2024: Abstracts*. – Kharkiv: UkrSURT, 2024. – P. 177–178 .

ЗМІСТ

Вступ.....	18
Розділ 1 Огляд сучасного стану теорії та практики організації вантажних перевезень в міжнародному сполученні.....	25
1.1 Аналіз впровадження інновацій в області міжнародних перевезень у світі	25
1.2 Огляд ринку міжнародних автомобільних перевезень України та оцінка його адаптації до умов воєнного стану і євроінтеграційних перспектив.....	35
1.3 Аналіз сучасних систем інформаційної підтримки прийняття управлінських рішень при міжнародних автомобільних перевезеннях.....	47
1.4 Висновки по розділу 1	55
Розділ 2 Теоретичні основи вибору методу організації міжнародних автомобільних перевезень	58
2.1 Інформаційно-технологічне забезпечення міжнародних вантажних перевезень	58
2.2 Моделювання та оптимізація логістичних операцій на основі технології крос-докінгу	65
2.3 Інформаційно-технологічні засади координації учасників процесу крос-докінгу	78
2.4 Методичний підхід до вибору раціональної транспортно-технологічної схеми доставки вантажів	89
2.5 Висновки по розділу 2	116
Розділ 3 Розробка інформаційних технологій підтримки прийняття рішень в управлінні міжнародними перевезеннями.....	118
3.1 Розробка імітаційної моделі для порівняльного аналізу сценаріїв доставки вантажів.....	118
3.2 Розробка імітаційної моделі для аналізу ефективності крос-докінгових операцій на логістичному центрі.....	125
3.3 Розробка автоматизованої системи побудови та оптимізації спільних операційних графіків	130

	17
3.4 Висновки по розділу 3	145
Розділ 4 Експериментальні дослідження та апробація розроблених методів і моделей.....	147
4.1 Експериментальні дослідження робастності спільних операційних графіків виконання робіт	147
4.2 Апробація імітаційної моделі крос-докінгу на прикладі логістичного терміналу.....	168
4.3 Дослідження впливу ключових факторів на ефективність схем доставки вантажів.....	177
4.4 Розробка практичних рекомендацій з оптимізації логістичних процесів.....	193
4.5 Порівняльний аналіз ефективності схем доставки вантажів методом попарного порівняння.....	203
4.6 Висновки по розділу 4	208
Висновки	211
Список використаних джерел	213
Додаток А Акти впровадження результатів дослідження	232
Додаток Б Список публікацій за темою дисертації та відомості про апробацію результатів дисертації.....	237
Додаток В Лістинг програми «LogisticsSim» (фрагмент)	241
Додаток Г Лістинг програми «Симулятор Крос-Докінгу» (фрагмент)	251
Додаток Д Лістинг програми імітації (фрагмент).....	258

ВСТУП

Актуальність теми. Транспортний сектор є ключовою складовою економіки будь-якої країни, а міжнародні автомобільні перевезення відіграють провідну роль у забезпеченні глобальних ланцюгів поставок завдяки своїй мобільності, швидкості та можливості доставки «від дверей до дверей». В умовах стрімкої глобалізації та посилення конкуренції головною рушійною силою розвитку галузі є впровадження інновацій, зокрема цифрових технологій, таких як Інтернет речей (IoT), блокчейн, хмарні сервіси та електронний документообіг (e-CMR). Їх застосування дозволяє підвищити ефективність, прозорість та безпеку перевізного процесу, однак їхнє впровадження ускладнюється високими початковими витратами та ризиками кібератак.

Для України, яка активно інтегрується до європейського економічного простору, ця тема набуває особливої гостроти. Розвиток вітчизняних перевізників стримується низкою системних проблем: невідповідністю автопарку екологічним нормам ЄС, недосконалістю нормативно-правової бази та низькою пропускнуною спроможністю митних переходів. Ситуація значно ускладнилася через повномасштабне військове вторгнення, що призвело до руйнування логістичних ланцюгів та виникнення нових ризиків. Водночас, підписання «транспортного безвізу» з ЄС та інтеграція в систему NCTS відкривають нові перспективи, що вимагає переосмислення традиційних підходів до управління перевезеннями.

Аналіз наукових праць показав, що більшість існуючих методик вибору транспортно-технологічних схем зосереджені переважно на критерії мінімізації фінансових витрат, часто ігноруючи такі важливі фактори, як час доставки, надійність та специфічні геополітичні ризики. Виявлено відсутність комплексних інструментів, які б інтегрували сучасні інформаційні технології в процес прийняття управлінських рішень, що підтверджує актуальність розробки нових моделей та методів для

підвищення ефективності міжнародних перевезень в умовах діджиталізації та підвищеної невизначеності.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Дисертаційна робота відповідає пріоритетним напрямам **Національної транспортної стратегії України на період до 2030 року**, схваленої розпорядженням Кабінету Міністрів України від 30 травня 2018 р. № 430-р, зокрема в частині підвищення конкурентоспроможності вітчизняних перевізників, впровадження інноваційних технологій для супроводу перевезень та створення єдиної інформаційної системи взаємодії видів транспорту.

Мета і задачі дослідження. Метою дослідження є підвищення ефективності доставки вантажів у міжнародному сполученні шляхом розробки та вдосконалення методів, моделей та системи підтримки прийняття рішень в управлінні перевізним процесом. Для досягнення поставленої мети необхідно було вирішити наступні **задачі**:

- проаналізувати сучасні підходи до організації міжнародних перевезень та обґрунтувати роль діджиталізації у підвищенні їх ефективності;
- розробити методичний підхід до вибору раціональної з чотирьох альтернативних схем доставки, що враховує декомпозицію логістичних витрат та специфічні ризики, з урахуванням оптимізації крос-докінгових операцій для ефективного управління ресурсами в умовах невизначеності та часових обмежень;
- розробити комплекс програмних інструментів для імітаційного моделювання та порівняльного аналізу сценаріїв доставки, аналізу ефективності крос-докінгу та автоматизованої побудови спільних операційних графіків;
- провести експериментальні дослідження та дослідити вплив ключових факторів на ефективність різних схем доставки для підприємств

різного розміру, розробити практичні рекомендації з оптимізації логістичних процесів на основі концепції адаптивного управління.

Об'єкт дослідження – процес організації та управління міжнародними автомобільними перевезеннями вантажів.

Предмет дослідження – методи, моделі та системи підтримки прийняття рішень для підвищення ефективності міжнародних вантажних перевезень.

Методи дослідження. Для вирішення поставлених задач використано комплекс загальнонаукових та спеціальних методів: системний аналіз – для дослідження структури та взаємозв'язків у логістичних системах; теорія ймовірностей та математична статистика – для аналізу стохастичних факторів; математичне програмування, зокрема цілочисельне програмування, – для розробки оптимізаційних моделей; імітаційне моделювання, зокрема метод дискретно-подійного моделювання, – для аналізу динамічних процесів та оцінки робастності графіків; регресійний аналіз – для побудови моделей залежності витрат від ключових факторів; метод попарного порівняння – для оцінки економічної ефективності альтернативних схем доставки.

Наукова новизна отриманих результатів полягає в тому, що:

- *вперше* для методичного підходу до вибору раціональної транспортно-технологічної схеми запропоновано використання специфічної геополітичної складової «військовий ризик», шляхом її інтеграції до комплексної цільової функції мінімізації загальних витрат;

- *набула подальшого розвитку* математична модель оптимізації крос-докінгових операцій, яка, на відміну від відомих, дозволяє комплексно вирішувати задачу розподілу транспортних засобів та вибору сценаріїв їх обслуговування з урахуванням обмежених ресурсів та часових вікон;

- *удосконалено* метод управління робастністю операційних графіків, який, на відміну від традиційного ситуативного реагування на операційні відхилення, базується на проактивному управлінні пропускнуою здатністю. Метод дозволяє за допомогою імітаційного моделювання

визначити «оптимальну робочу зону» рівня завантаження ресурсів та реалізувати адаптивну стратегію планування, що передбачає динамічну зміну цільового завантаження залежно від прогнозованого ступеня невизначеності зовнішнього середовища.

Практичне значення результатів дослідження полягає у розробці комплексу спеціалізованих програмних інструментів («LogisticsSim», «Симулятор Крос-Докінгу», інформаційної технології побудови графіків), що слугують для підтримки прийняття рішень на операційному, тактичному та стратегічному рівнях управління міжнародними перевезеннями. Застосування розробленого інструментарію дозволяє логістичним компаніям проводити детальний аналіз альтернативних сценаріїв доставки з урахуванням сучасних ризиків, виявляти «вузькі місця» в роботі терміналів та оптимізувати їх ресурсні конфігурації. Методичні підходи та практичні рекомендації, розроблені в дисертації, надають науково обґрунтовану базу для вибору оптимальної архітектури логістичної мережі залежно від розміру діяльності підприємства, доводячи доцільність консолідації для малих компаній та деконсолідації для середніх і великих. Впровадження запропонованої адаптивної політики управління, що базується на концепції «оптимальної робочої зони», дозволяє оперативно коригувати логістичні процеси відповідно до рівня стохастичності середовища, знижуючи сукупні витрати.

Результати дисертаційної роботи впроваджені у навчальний процес у Харківському національному автомобільно-дорожньому університеті у лекційних курсах «Вантажні перевезення», «Організація міжнародних перевезень» та у дипломне проектування для студентів, що навчаються за спеціальністю І8 «Автомобільний транспорт» за освітньо-професійною програмою «Організація перевезень і управління на автомобільному транспорті».

Особистий внесок здобувача. Всі результати, що наведені в дисертаційній роботі, одержані здобувачем особисто або за його

безпосередньою участю. За матеріалами дисертації у співавторстві опубліковано **5 статей у фахових виданнях**. Здобувачем особисто сформульовано удосконалений методичний підхід до вибору раціональної транспортно-технологічної схеми з альтернативних варіантів, що вперше враховує специфічну складову «військового ризику» в цільовій функції мінімізації витрат; розроблено математичну модель оптимізації крос-докінгових операцій для комплексного вирішення задачі розподілу ресурсів та вибору сценаріїв обслуговування в умовах невизначеності; створено комплекс спеціалізованих програмних інструментів, що включає імітаційні моделі «LogisticsSim» і «Симулятор Крос-Докінгу» та інформаційну технологію для автоматизованої побудови спільних операційних графіків; проведено апробацію розроблених моделей на прикладі умовного логістичного терміналу, що підтвердило їх адекватність та практичну цінність; виконано статистичну обробку результатів експериментальних досліджень та побудовано регресійні моделі для визначення впливу ключових факторів на загальні логістичні витрати.

Обґрунтованість та достовірність отриманих в дисертаційній роботі наукових положень, висновків та рекомендацій підтверджується коректним застосуванням сучасних методів дослідження, зокрема системного аналізу, теорії ймовірностей, математичного програмування та імітаційного моделювання. Достовірність забезпечується проведенням достатнього обсягу експериментальних досліджень за допомогою розробленого комплексу програмних інструментів, апробацією ключових результатів на міжнародних науково-практичних конференціях та у фахових виданнях, а також перевіркою адекватності розроблених моделей на прикладах, що імітують реальні умови функціонування логістичних систем.

Апробація результатів дисертації. Матеріали та результати дисертаційної роботи доповідалися, обговорювалися та були схвалені на:

- 77-ї науковій конференції професорсько-викладацького складу, аспірантів, студентів та співробітників відокремлених структурних підрозділів університету, НТУ м. Київ, грудень 2021 р.;
- всеукраїнській науково-практичній конференції здобувачів вищої освіти і молодих учених «Комп'ютерно-інтегровані технології автоматизації технологічних процесів на транспорті та у виробництві», ХНАДУ м. Харків, 10 листопада 2021 р.;
- всеукраїнській науково-практичній конференції «Питання сучасної модернізації науки та освіти», ХНАДУ м. Харків, 25 травня 2022 р.;
- the 5 th International scientific and practical conference “Science, innovations and education: problems and prospects” (December 8-10, 2021) CPN Publishing Group, Tokyo, Japan. 2021;
- 79-ої науковій конференції професорсько-викладацького складу, аспірантів, студентів та співробітників відокремлених структурних підрозділів університету збірник тез доповідей. Київ: НТУ, 2023. Вип. 79;
- 86-ї науково-технічній та науково-методичній конференції університету (ХНАДУ). Секція транспортних технологій. 10-11 травня 2023 року. Харків;
- IV міжнародній науково-практичній інтернет-конференції «Напрями розвитку технологічних систем і логістики в АПВ», 20 квітня, Київ;
- міжнародній науково-технічній конференції «Розумний транспорт та інтегровані транспортні технології», Х:ХНАДУ, 2023 р.;
- третій міжнародній науково-практичній конференції «Перспективи розвитку автомобільного транспорту та інфраструктури», ДП «ДержавтотрансНДІпроект», Київ, 2023 р.;
- IX міжнародній науково-практичній конференції «Topical aspects of modern scientific research», 16-18.05.2024, Токіо, Японія;

- міжнародній науково-практичній конференції «Сучасні проблеми функціонування логістичних систем. Сталий розвиток транспортних систем: наука і практика» 25-26 листопада 2024 року, ХНАДУ, 2024 р.;
- 5-й міжнародній науково-технічній конференції «Інтелектуальні транспортні технології», Харків, 25–27 листопада 2024 р. УкрДУЗТ;
- 21st Scientific and technical conference transport systems theory and practice, Katowice, September 9-10, 2025. 12 p.

Публікації. Результати наукових досліджень за темою дисертаційної роботи опубліковані в 19 друкованих працях, із них: 5 у періодичних фахових виданнях, що входять до переліку МОН України (включені до міжнародної наукометричної бази Scholar Google); 1 стаття у виданні, що включене до наукометричної бази SCOPUS; 13 у збірках праць за матеріалами наукових конференцій.

Структура дисертації. Дисертація складається з вступу, чотирьох розділів, загальних висновків, бібліографії з 151 найменування і 5 додатків. Загальний обсяг роботи складає 268 сторінок, у тому числі 194 сторінки основного тексту, 57 рисунків, 33 таблиці.

РОЗДІЛ 1

ОГЛЯД СУЧАСНОГО СТАНУ ТЕОРІЇ ТА ПРАКТИКИ ОРГАНІЗАЦІЇ ВАНТАЖНИХ ПЕРЕВЕЗЕНЬ В МІЖНАРОДНОМУ СПОЛУЧЕННІ

1.1 Аналіз впровадження інновацій в області міжнародних перевезень у світі

Транспортний сектор є невід’ємною складовою економіки країни, забезпечує її функціональність та розвиток, значно впливає на її показники та є основою інтеграції на світові ринки. Значну роль в розвитку економіки країни має автомобільний транспорт, він відрізняється високою швидкістю доставки [1], безпекою [2], мобільністю [3], доставкою «від дверей до дверей» [4], регулярністю поставок [5], та особливо прибутковим напрямом діяльності автомобільного транспорту є виконання міжнародних перевезень вантажів [6]. Сучасна економіка має значний вплив на транспорт та визначає його завдання з підвищення якості обслуговування клієнтів, збільшення обсягів перевезень, зниження безпекових ризиків перевезення та зменшення вартості перевезення.

В умовах стрімкого розвитку та трансформації сучасного суспільства, інтеграції світової економіки, глобалізації транспорту, інновації вже заповнюють транспортний сектор та особливо область міжнародних перевезень системами відслідковування [7–9], електронними ідентифікаторами [10], цифровими платформами [11] тощо. Із загостренням конкурентної боротьби на транспортному ринку звичні методи не дають бажаного результату, або зовсім безрезультатні, отже єдиним критерієм до конкурентної переваги є здібність до інновацій [12].

Термін «інновація» вперше запровадив австрійський вчений Й. Шумпеттер у своїй праці «Теорії економічного розвитку» [13]. Вчений вперше розглянув комплекс трансформацій у розвитку (тобто інновації) і повністю описав процес, виділивши п’ять основних трансформацій у розвитку: впровадження нової технології виробництва, впровадження нової

продукції, використання нових матеріалів, трансформація матеріально-технічного забезпечення, вихід на новий ринок. Й. Шумпеттер інновацію вважає основним джерелом прибутку.

В сфері перевезення вантажів під інновацією необхідно вважати різні нові технології та продукти, за допомогою яких прискорюються та підвищується процес доставки вантажів на всіх етапах – від обробки заявки на перевезення до отримання вантажоодержувачем вантажу. Інновації в області перевезення вантажів складаються з організації, фінансування, технічного оснащення, інтелектуальної діяльності, головним завданням яких є запровадження нових продуктів та технологій організації перевезень, або значне покращення вже існуючих. Інноваційні рішення у сфері перевезень спрямовані на підвищення адаптивності транспортно-логістичних систем до збільшення обсягів попиту в умовах ресурсних обмежень [14]. Інноваційна діяльність в цій сфері повинна вирішувати наступні задачі (рис 1.1).



Рисунок 1.1 – Інноваційні рішення при перевезенні вантажів

Міжнародні вантажні перевезення належать до фізичного процесу переміщення товарів між країнами водним, повітряним, залізничним, автомобільним, трубопровідним транспортом. Міжнародні вантажні перевезення можуть включати багато зацікавлених сторін, включаючи одного або декількох вантажовідправників, перевізників, експедиторів, сторонні логістичні служби і митницю двох або більше країн для кожного перевезення. У порівнянні з перевезенням товарів усередині країни, міжнародні вантажні перевезення характеризуються великими обсягами перевезення та більшими відстанями доставки, використанням транспортних засобів з великою вантажопідйомністю, а також процесами перетину кордонів, все це сприяє високій складності управління міжнародними вантажними перевезеннями.

Діджиталізація, включаючи автоматизацію, оцифровані інформаційні потоки та штучний інтелект, надає багато можливостей для підвищення ефективності, зниження витрат та підвищення рівня обслуговування та управління у секторі міжнародних вантажних автомобільних перевезень. Діджиталізація також може радикально змінити бізнес-екосистему у цьому секторі. Однак дана галузь фрагментована та має структуру конкуренції, яка строго орієнтована на мінімізацію витрат, що може сповільнити темпи впровадження нових технологій. Діджиталізація створює безліч змін, що стосуються сектора міжнародних вантажних перевезень, включаючи наприклад циркулярну економіку [15], електронну комерцію [16], нові бізнес-моделі та автоматизацію [17].

Автор у своїй роботі [18] стверджує що діджиталізація в транспортній галузі переважає всі інші конкурентні переваги та виводить транспортну компанію на більш вищий рівень від своїх конкурентів. Небажаючи використовувати новітні інноваційні рішення транспортні компанії стають не конкурентоспроможні та витісняються з ринку. К. Січкаренко у своїй статті наводить переваги та недоліки використання інформаційних технологій наведені у таблиці 1.1.

Таблиця 1.1 – Переваги та недоліки використання інформаційних технологій

Використання автоматизованих транспортних систем	
Недоліки	Переваги
скорочення робочих місць	зниження витрат на виплату заробітної плати
невідповідальність у разі форс-мажору	підвищення ефективності транспортної сфери
ризик відмови програмного забезпечення	відсутність ризику людської помилки
великі початкові витрати на впровадження цифрових технологій	забезпечення транспарентності перевізного процесу

Транспортна галузь та особливо сфера перевезення вантажів за останні п'ять років стрімко піддається впливу та впровадженню інформаційних технологій, особливо значним поштовхом до діджиталізації стала всесвітня пандемія та ряд заборон та обмежень на пересування та транспортування вантажів, особливо в міжнародному сполученні. Активно використовуються і впроваджуються на транспорті та в області міжнародних перевезень наступні діджитал-технології (рис. 1.2)

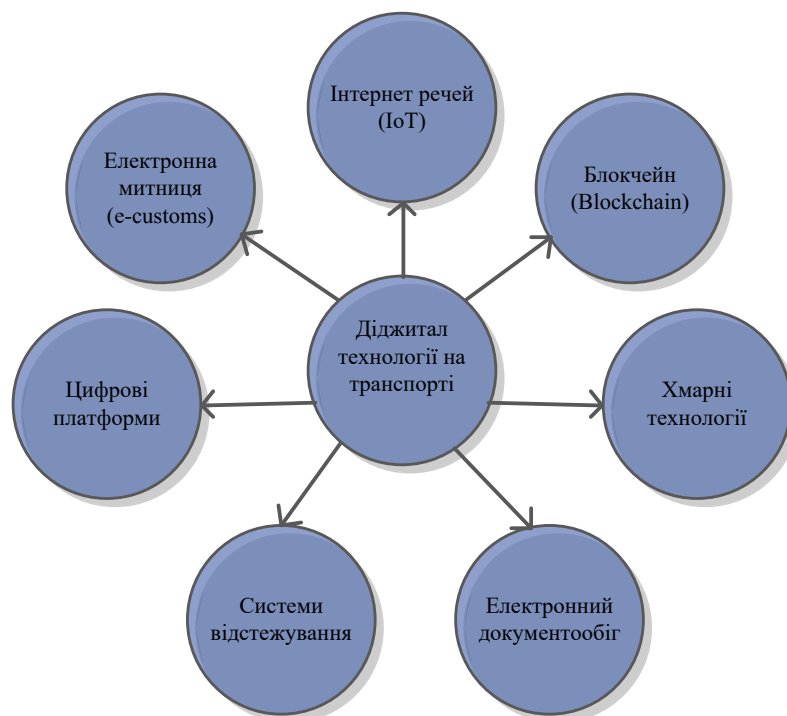


Рисунок 1.2 – Інноваційні діджитал-технології на транспорті

Гринчак Н. А. в своїй роботі [19] під технологією IoT має на увазі об'єднання матеріальних об'єктів з мережею Інтернет та між собою, головною метою яких є виконання самостійних операцій зі збору, обробки, зберігання інформації, ідентифікації та прийняття рішень відповідно до утворюючих умов, трансформації вже існуючої мережі доставки вантажів в інтелектуально-швидку.

Інтернет речей відкриває великі можливості в області міжнародних перевезень вантажів та підвищує конкурентність транспортних підприємств та якість надання послуг клієнтам. Використання технології IoT дозволяє відстежувати рух транспортних засобів та місцезнаходження, температурні умови та вологість всередині кузова автомобіля. Технологія IoT виконує інтерактивні та комплексні послуги по моніторингу, статусу доставки із зазначенням місця розташування [20].

За рахунок використання супутникового позиціонування та Інтернету речей можливо комплексно відстежувати стан і місцезнаходження автомобіля та вантажу. На основі даної технології впроваджується використання таких систем відстежування транспортних засобів (табл. 1.2).

Переваги використання технології Інтернет речей при здійсненні вантажних перевезень у міжнародному сполученні:

- безперервний моніторинг процесу перевезення вантажу та миттєве реагування у разі відхилення від заданих умов та форс-мажору;
- оптимізація маршрутизації, зниження витрат на доставку вантажу;
- автоматизація процесів та виключення фактору людської помилки;
- покращення якості обслуговування клієнтів за рахунок надання доступу до моніторингу доставки вантажу;
- підвищення конкурентоспроможності та іміджу підприємства на ринку транспортних послуг.

Таблиця 1.2 – Системи відстежування перевезення вантажу

Назва технології	Переваги використання
Цифрове маркування	Дозволяє відстежувати стан та місце вантажу, пошкодження вантажу, несанкціоновані переміщення, крадіжку вантажу, також умови перевезення вантажу (відповідність температурних режимів, вологості).
Електронна навігаційна пломба	Контролює процес доставки вантажу у реальному часі, знижує час проходження митниці, зменшує витрати на доставку вантажу, підвищує схоронність вантажу так як при зломі пломби система миттєво реагує та надсилає повідомлення, прискорює прийняття необхідних мір для збереження вантажу. Також система фіксує всю історію пломбування, можливе багаторазове використання
Система віддаленого управління контейнерами RCM	Дана система відслідковує місце знаходження рефконтейнера, температуру, вологість, стан контейнеру, підключення до мережі, дозволяє швидко відреагувати на несправність контейнеру та забезпечити задовільний стан для перевезення вантажу. RCM дозволяє клієнтам мати доступ до своєї бази та віддалено відслідковувати та завантажувати необхідні данні щодо вантажу. Знижує витрати та час на перевірку контейнера після прибуття вантажоодержувачу
RFID-мітка	Відстежує не тільки місце знаходження транспортного засобу а й технічний стан, ефективність його використання, являє собою більш надійну систему ніж цифрове маркування, можливе повторне використання та перезапис інформації
Системи GPSM з GPS GSM та GPS трекер FixOn	Дана система відслідковує місце знаходження транспортного засобу і витрати палива, система активно використовується не тільки на автомобільному транспорті а й на водному, залізничному. Найбільшою перевагою використання системи GPSM з GPS GSM є зниження витрат на паливо, протиугінна система. GPS моніторинг дозволяє отримувати сигнал у разі відхилення транспортного засобу з запланованого маршруту, відхилення від графіку, потрапляння в аварію. Використання трекера дозволяє відслідковувати моменти навантаження-розвантаження, автоматизує складання маршрутних листів, графіків руху
FREETRACK	Система моніторингу вантажного автомобіля, температурних показників та вологості, у разі відхилення від запланованих показників миттєво реагує та формує звіт. Підвищує рівень безпеки використання авто через gprs-термінал протоколи, у разі не ідентифікації водія блокуються двері та двигун

Розроблено на основі джерел [20–26].

Автор у своїй статті [27] виділяє такі переваги використання хмарних технологій в сфері транспорту:

- зменшення кількості фахівців для обробки інформації, що призводить до зниження витрат;
- доступність до даних в будь-який час через Інтернет;
- гнучкість, можливість змінювати, доповнювати інформацію в залежності від необхідності умов;
- безпечність використання даної технології, без необхідності до резервування даних в інших системах.

В статті [28] розглянуто особливості впровадження хмарних технологій та телеметрії в міжнародних транспортних коридорах що дозволяють відстежувати стан та пересування транспортних засобів, техніко-експлуатаційні показники, використовувати інформаційні данні для оптимізації маршрутизації.

На основі технологій Інтернета речей та хмарних технологій розробляються і впроваджуються в процес організації міжнародних перевезень вантажів наступні технології (табл. 1.3).

Таблиця 1.3 – Сутність і переваги впровадження інноваційних технологій у перевезеннях

Назва технології	Сутність та перевага використання технології
Блокчейн (Blockchain)	Використання даної технології забезпечує прозорість операцій перевезення вантажу, інформує про місце знаходження автомобіля за допомогою датчиків, розміщених в кузові, відслідковує температуру та вологість. Інформація розміщена в системі блокчейн доступна всім учасникам процесу, що знижує час та витрати при перетині кордону. При організації перевезень в міжнародному сполученні дозволяє швидко проведення розрахункових операцій, зниження їх вартості, ризиків та помилок при розрахунку. Підвищує ефективність перевезення вантажу та імідж компанії за рахунок використання смарт-контрактів, взаємної перевірки відповідності даних, використання прозорих актуальних даних
Електронний документооборот	Перехід до е-документообігу знижує витрати та час на оформлення документації, ліквідує паперову роботу, підвищує точність даних, дає доступність 24/7, має юридичну силу документа (в системах е-документообігу є цифровий підпис), надає швидкий обмін документами, прискорення взаєморозрахунків між учасниками, контроль за процесом доставки. При міжнародних перевезеннях активно використовується е-CMR, E-FREIGHT, електронні квитки

Продовження таблиці 1.3

Назва технології	Сутність та перевага використання технології
Електронна митниця	Впровадження цієї технології скорочує час проходження митниці за рахунок швидкого надходження електронних документів в базу та відповідно витрати на доставку вантажу, прискорює час доставки вантажу. Перехід до електронної митниці дозволяє обмінюватися даними між всіма митницями ЄС та транспортними підприємствами при експорті та імпорті товарів. Використання електронної митниці робить прозорими митні операції та процес перевезення
Цифрові платформи	Цифрові платформи надають послуги з організації перевезення вантажів, об'єднують та надають доступ до інформації всім учасникам процесу перевезення. За допомогою даної технології відбувається процес обробки заявки на перевезення вантажу, оформлення документів, страхування вантажу, клієнтам надається можливість відслідковування вантажу, часу навантаження-розвантаження, тривалість проходження митного кордону, доступ до даних в будь який час, можливість розрахувати вартість доставки на основі тарифних показників. Використання цифрової платформи дозволяє транспортній компанії уникати порожніх пробігів за рахунок швидкого знаходження зворотних завантажень, та ефективно використовувати транспортні засоби довантажуючи у разі необхідності

Розроблено на основі джерел [29–37]

Незважаючи на значні переваги впровадження і використання діджитал-технологій при організації міжнародних вантажних перевезень значними недоліками є: можливість кіберзлочинності, крадіжки особистих даних, необхідність постійного з'єднання з інтернетом, DDOS атаки на систему, координація (можливі збої системи при проходженню маршруту в іншій країні через різні часові пояси, різні мови), тому необхідно завжди мати резервні копії в хмарних системах з біометричним захистом даних.

На основі технології блокчейн створено програмні забезпечення, найвідоміші з них: Yojee (Сінгапур) [38], A2b Direct (Україна) [39], Ethereum (Гонконг) [40], Shipchain (США) [41], які активно використовуються як в логістиці, так і для міжнародних перевезень вантажів, суть цих онлайн-платформ полягає у забезпеченні відстеження вантажів у реальному часі, час надходження вантажу, оформлення смарт-контрактів, проведення взаєморозрахунків, забезпечують прямий зв'язок між вантажовласником та вантажоперевізником.

Для автоматизації маршрутизації перевезень вантажів та зниження витрат на доставку використовують діджитал-технології на основі хмарних систем управління автотранспортом, найбільш широке застосування отримали: ABM Rinkai TMS [42], Oguar TMS [43].

Для знаходження клієнтів та вантажу використовуються транспортні біржи або платформи, такі як Della.ua, Trans.eu, Cargo.lt та інші, використовуються як на міжнародних так і внутрішніх ринках, і мають популярність не тільки серед автоперевізників. В останні роки набули популярності цифрові платформи CHRONOTRUCK [44] та Cargofy [45], за допомогою даних платформ можливо аналізувати потоки вантажів та попит, автоматично формуються оптимальні маршрути, суттєво знижують витрати на доставку, після оплати є можливість відслідковувати місце знаходження вантажу.

З 2026 року Європейський Союз запроваджує обов'язкове використання е-CMR. Переваги використання електронних накладних:

- швидкий час оформлення та зниження ціни на оформлення з 6,23 євро до 1,69 євро [46];
- покращення екологічних показників за рахунок зменшення використання паперу;
- архівування даних та великий час зберігання;
- можливість швидкої оплати;
- доступність до інформації в будь-який час.

У липні 2020 року набув чинності закон «Про приєднання України до Додаткового протоколу до Конвенції про договір міжнародного автомобільного перевезення вантажів про електронну накладну» [47], закон дозволяє оформлювати товаро-транспортну накладну в електронному вигляді. До даного протоколу приєдналось 29 держав [46]. Не дивлячись на довге існування додаткового протоколу про е-CMR, його використання становить приблизно більше 1 % [48], такий незначний показник зумовлений відсутністю уніфікованого програмного забезпечення, яке б відповідало

високим вимогам до захисту даних та забезпечувало сумісність інформаційних систем між країнами-партнерами.

Автор у своїй статті [49] виділяє негативну тенденцію зниження частки фінансування на впровадження інновацій в транспорті компанії в Україні. В жорстоких умовах конкуренції на міжнародних транспортних ринках тільки інновації та використання діджитал-технологій можуть забезпечити стабільне існування транспортним компаніям. Одним із перспективних напрямків залучення коштів для впровадження інновацій є активна участь у міжнародних проєктах та програмах.

Шатіло О.В. [50] виділяє наступні проблеми впровадження інновацій на автотранспортних підприємствах – нестача фінансових можливостей, брак пільгових кредитів для транспортних підприємств, висока ціна на впровадження інновацій, нестача кваліфікаційних працівників, проблематичність отримання державного фінансування, недосконалість законодавчого регулювання фінансування інноваційних проєктів.

Україна, як євроінтегрована держава, послідовно впроваджує сучасні практики цифрової трансформації, зокрема у сфері транспортної логістики та міжнародних перевезень. Виконання Транспортної Стратегії України до 2030 року сприятиме інтеграції України на внутрішній ринок ЄС [51]. Серед основних напрямів щодо міжнародних перевезень вантажів визначені такі:

- підвищення конкурентоспроможності вітчизняних перевізників на міжнародних ринках;
- впровадження інноваційних технологій для супроводу перевезення вантажу, створення єдиної інформаційної системи технологічної взаємодії всіх видів транспорту;
- використання «хмарних» технологій для обробки та зберігання інформації щодо доставки вантажів;
- впровадження спільного митно-прикордонного контролю та обміну інформацією між всіма митницями ЄС.

1.2 Огляд ринку міжнародних автомобільних перевезень України та оцінка його адаптації до умов воєнного стану і євроінтеграційних перспектив

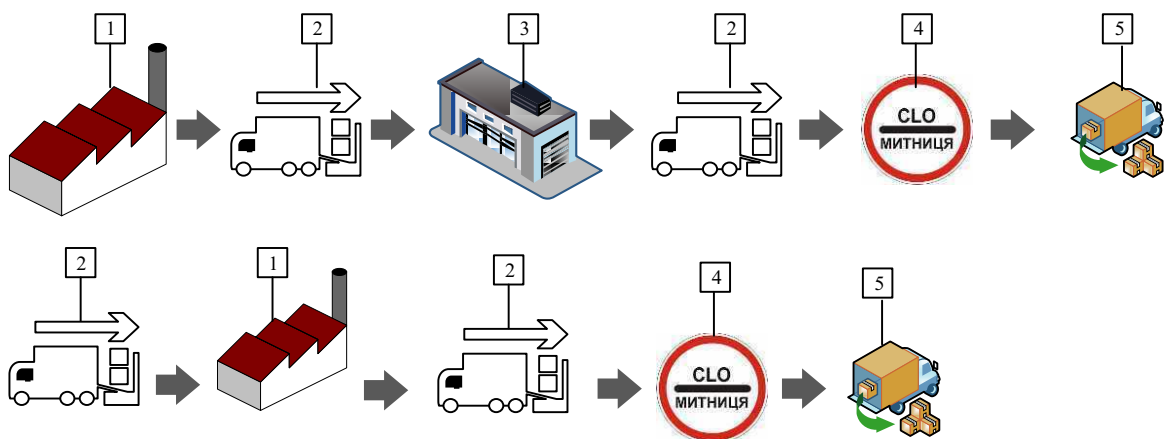
Перевезення вантажів значно впливає на економіку країни та розвиток взаємозв'язків з країнами партнерами особливо з країнами ЄС. За останнє десятиліття на ринку транспортних послуг спостерігається збільшення попиту на міжнародні вантажні перевезення. На даний час для транспортних компаній які вийшли на європейський ринок, який стрімко розвивається, гостро стоїть питання підвищення конкурентоспроможності та якості надання транспортних послуг, ефективності перевезення та зниження витрат. Забезпечення своєчасної доставки без затримок можливе лише за умови оптимізації організаційно-технологічних процесів перевезення та вибору раціональної транспортно-технологічної схеми доставки (ТТСД). Вибір оптимальної схеми доставки є важливим елементом управління логістичним ланцюгом і становить спільний інтерес для всіх учасників транспортного процесу [52].

В різних джерелах надається різне визначення ТТСД [53–56], узагальнюючи підходи дослідників, можна визначити ТТСД як комплекс взаємопов'язаних технологічних операцій, спрямованих на досягнення максимальної ефективності перевезення вантажів за мінімальних витрат ресурсів. Розробка ТТСД включає в себе – оцінювання специфіки перевезення, маршрутизацію, підбір виду транспорту в залежності від умов перевезення одного або n – кількості вантажу, тари та упаковки, навантажувально-розвантажувальних механізмів, розташування складів та терміналів за необхідністю, оформлення транспортної документації, вибір методів контролю ефективності, якості та безпеки перевезення [53–59]. Застосовуються різні критерії вибору раціональної схеми доставки вантажів, основним критерієм вибору є мінімальні витрати на перевезення, час доставки вантажу, надійність та якість, безпека перевезення, продуктивність

транспортних засобів, втрати вантажу під час перевалок, гнучкість схеми доставки, собівартість перевезення, прибуток від перевезень [60–66].

Підвищенням ефективності доставки вантажів у міжнародному сполученні за рахунок впровадження раціональної схеми доставки займалися наступні вчені: Нагорний Є.В., Ломотько Д.В., Наумов В.С., Процик О.П., Шраменко Н.Ю., Великодний Д.О., Павленко О.В., Орда О.О., Копитков Д.М., Поліщук В. П. та інші.

В роботі [67] запропоновано дві схеми доставки тарно-штучних вантажів у міжнародному сполученні (рис. 1.3), «вантажовідправники – склад – вантажоодержувачі» та «перевізник з АТП-вантажовідправники – вантажоодержувачі». Автори врахували тільки витрати на перевезення, не враховуючи час доставки, що дуже важливо при міжнародних вантажних перевезеннях.



1 – вантажовідправники, 2 – перевізник з АТП, 3 – склад, 4 – митниця,
5 – вантажоодержувачі

Рисунок 1.3 – Схеми доставки вантажів у міжнародному сполученні

У роботах [59, 68] наведено приклади реалізації транспортно-технологічних схем доставки вантажів, проте зазначені дослідження не містять достатнього математичного підтвердження їх ефективності та оптимальності використання.

Очеретенко С.В. та Дмитрієва К.С. [69] розглянули три схеми доставки вантажів за маршрутом Київ (Україна) – Шимкент (Казахстан) – дві наскрізні автомобільні та одну комбіновану, що поєднує автомобільний і морський транспорт. Оптимальну схему визначали за критеріями вартості перевезення та часу доставки. Недоліком дослідження є неврахування варіантів з використанням терміналів, які могли б знизити загальні витрати.

Автором в роботі [70] представлена схема доставки вантажів транспортним коридором «Південь-Захід», схема включає автомобільний, морський та залізничний вид транспорту з перевантаження на терміналі, описуються показники ефективності транспортної схеми такі як вартість та час доставки, не врахована кількість терміналів та місце знаходження що може знизити ефективність використання транспортної схеми.

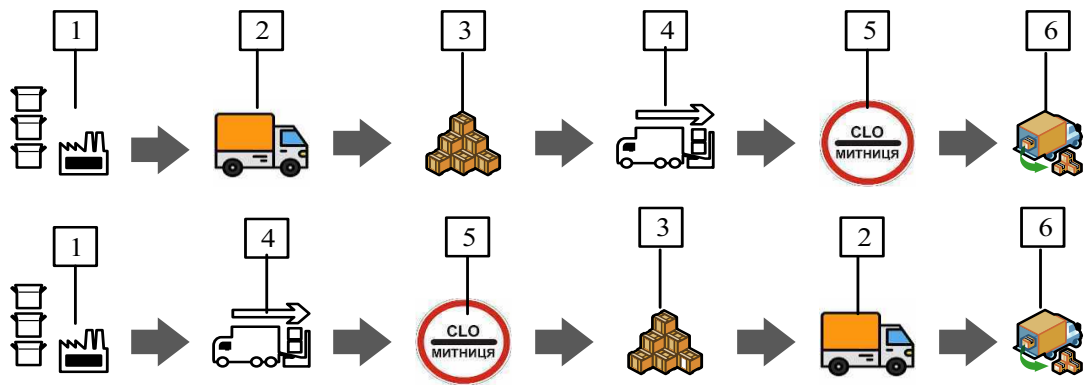
Павленко О.В. та Великодний Д.О. у своїй роботі [71] запропонували три альтернативні транспортно-технологічні схеми міжнародної доставки зерна. Перша схема передбачає перевезення зерна залізничним транспортом до морського порту або терміналу, подальше перевантаження в контейнер і доставку морським транспортом до вантажоодержувача. Автори відзначають недоліки цього варіанту, втрати вантажу під час перевантаження (близько 7 %), складність прогнозування терміну доставки та значні витрати на митне оформлення. Друга схема включає доставку зерна до порту відправлення залізницею, а з порту прибуття автомобільним транспортом, при цьому втрати зменшуються приблизно на 2 %, однак залишаються проблеми з відсутністю чіткого графіка постачань і організації вантажно-розвантажувальних робіт. У третій схемі навантаження зерна здійснюється безпосередньо в контейнер із подальшим перевезенням залізницею до порту та морською доставкою, що практично усуває втрати вантажу. Автори математично обґрунтовують доцільність кожного варіанту та подають методику вибору раціональної схеми доставки. Водночас у роботі не розглянуто можливі схеми транспортування зерна виключно автомобільним або залізничним транспортом без залучення морських перевезень та

додаткових перевантажень, що могло б підвищити збереження вантажу. Крім того, вибір раціональної схеми здійснюється лише за критерієм мінімальних витрат, без урахування часу доставки та якісних показників транспортного процесу.

В статті [72] розглянуті можливі комбінації використання автомобільного та залізничного транспорту для переміщення вантажів у міжнародному контрейлерному сполученні, представлена економічно-математична модель доцільності використання тієї чи іншої схеми в залежності від місця знаходження вантажовідправника, як і в більшості робіт, автор виділяє критерій вибору раціональної схеми тільки загальні витрати на перевезення вантажу, не враховуючі ризики взаємодії автомобільного та залізничного транспорту, форс-мажорні обставини, час на доставку та додаткові витрати на перевантаження вантажів.

Авторами [73] для компанії «Inter Trans Logistics» було розроблено 10 альтернативних схем доставки вантажу в контейнерах в міжнародному сполученні з використанням автомобільного, залізничного та морського транспорту. Автори врахували можливі комбінації операцій, специфічні умови клієнта та обмеження ресурсів у системі доставки. В роботі виділяється, що найголовнішим фактором вибору оптимальної схеми виступають витрати на доставку, тому авторами далі розроблено методику вибору оптимальної схеми з детальним врахуванням можливих факторів впливу на систему вибору.

Автори в роботі [74] представили схеми доставки консолідованих вантажів у міжнародному сполученні (рис. 1.4) з використанням терміналів. Оптимізацію здійснено за критерієм мінімізації сумарних витрат на виконання всіх технологічних операцій у схемі доставки. Водночас авторами не враховано вплив часу доставки, що збільшується внаслідок консолідації вантажів на терміналах і зростання кількості вантажно-розвантажувальних операцій, а також не розглянуто показники продуктивності транспортних засобів і енергоємності транспортно-технологічних процесів.



1 – вантажовідправники, 2 – транспортна компанія здійснює дрібнопартійні перевезення, 3 – термінал, 4 – міжнародна транспортна компанія, що здійснює збірні перевезення, 5 – митниця, 6 – вантажоодержувачі.

Рисунок 1.4 – Схеми доставки консолідованих вантажів у міжнародному сполученні

На теперішній час використовуються наступні транспортно-технологічні схеми з використанням різних видів транспорту, які представлені в таблиці 1.4.

Таблиця 1.4 – Існуючі схеми доставки вантажів у міжнародному сполученні

Вид транспорту	Схема доставки
Автомобільний	ВВ-АТ-ВО
Залізничний транспорт	ВВ – П1 – М – П2 – ВО
Морський транспорт	МП-ПН-МТ-МП-ПР
Взаємодія автомобільного та залізничного транспорту	ВВ – П1 – М – АТ2 – ВО
	ВВ – П1 – М – АТ2 – ВО
	ВВ – АТ1 – М – П2 – ВО
	ВВ – АТ1 – М – АТ2 – ВО
	ВВ – П1 – М – П2 – АТ2 – ВО
	ВВ – АТ1 – П1 – М – П2 – ВО
	ВВ – АТ1 – М – П2 – АТ2 – ВО
	ВВ – АТ1 – П1 – М – АТ2 – ВО

Продовження таблиці 1.4

Вид транспорту	Схема доставки
Взаємодія автомобільного та водного транспорту	ВВ – АТ – МП – Т – МТ – ВО
	ВВ – АТ – МП – Т – МТ – АТ – ВО
	ВВ – АТ – РП – РТ – МП – МТ – ВО
	ВВ – РП – РТ – АТ – ВО

Розроблено на основі джерел [78–81].

У таблиці 1.4 прийняті такі позначення – ВВ – вантажовідправник; ВО – вантажоодержувач; АТ – автомобільний транспорт; М – магістральна залізнична дорога; П1, П2 – під'їзна залізнична колія вантажовласників у початковому та кінцевому пунктах, МП – морський порт, МТ – морський транспорт, Т – термінал, РП – річковий порт, РТ – річковий транспорт.

Взаємодії та управлінню різними видами транспорту – автомобільним, залізничним та водним присвячені дослідження [82–86]. Аналізуючи літературні джерела, щодо взаємодії видів транспорту при перевезенні вантажів у міжнародному сполученні та стан міжнародних перевезень під час повномасштабного вторгнення російської федерації на територію України можна виділити переваги та недоліки (табл. 1.5). Завдяки перевагам та недолікам кожного виду транспорту можливо визначити раціональні комбінації взаємодії видів транспорту.

Таблиця 1.5 – Переваги та недоліки використання різних видів транспорту

Вид транспорту	Переваги	Недоліки
Автомобільний	Велика мобільність, доставка від дверей до дверей, частота поставок, перевезення дрібними партіями, висока швидкість доставки, універсальність, немає необхідності перевантаження вантажу на інші види транспорту, що покращує схоронність вантажу, можливість швидко змінювати маршрут в залежності від умов	Висока собівартість перевезення у порівнянні з іншими видами транспорту, негайність розвантаження, незначна вантажопідйомність, можливість розкрадання вантажу під час перевезення, дефіцит пального та водіїв, не відповідність стандартам екологічності в ЄС, великі черги при перетині кордону затримка часу доставки

Продовження таблиці 1.5

Залізничний транспорт	Доставка вантажів великими партіями, велика вантажопідйомність, незалежність від кліматичних умов, невисока собівартість перевезення, потужна пропускна спроможність, висока екологічність транспорту	Нижча продуктивність у порівнянні з іншими видами транспорту, неможливість виконання доставки точно до вантажоодержувача (необхідність залучення автомобільного транспорту), різна ширина колії в Україні та ЄС, підвищення тарифів на перевезення через військові дії, пошкодження залізничного полотна призводить до збільшення часу перевезення, прив'язаність до маршруту та складнощі при оперативному управлінню перевезеннями
Водний транспорт	Велика пропускна спроможність як морського так і річкового виду транспорту, регулярність поставок	Сезонність перевезення, висока вартість, низька швидкість доставки, через військові дії блокування портів, можливість вивезення лише зерна, зниження використання річкового транспорту, низька мобільність, невідповідність русл та мілководдя в областях де не йдуть бойові дії для перевезення вантажів
Авіаційний транспорт	—	Повністю заблокований

Розроблено на основі джерел [75, 87–90]

В роботах представлено багато різноманітних схем доставки вантажів, обираючи ту, чи іншу схему, необхідно брати до уваги не тільки мінімальні витрати на перевезення, хоча вони являються головним критерієм ефективності обраної схеми, але регулярність та своєчасність доставки є не менш важливим критерієм. Дивлячись на те, як стрімко розвивається ринок транспортних послуг, висуваючи нові критерії щодо ефективності організації та управління міжнародних вантажних автомобільних перевезень, необхідні нові методи управління. Таким чином, вибір оптимальної ТТС доставки у міжнародних перевезеннях має здійснюватися з урахуванням обсягів перевезень, термінів доставки та багаторівневої взаємодії між видами транспорту. Вирішальним чинником є узгодження інтересів усіх учасників логістичного процесу з метою забезпечення ефективності та надійності

перевезень В роботах відсутній розгляд сучасних інформаційних технологій організації контролю та управління перевезення вантажів.

В сучасних реаліях набувають стрімкого розвитку економічні відносини між Україною та країнами Європейського Союзу (ЄС), значно підвищується роль транспорту та забезпечення міжнародної торгівлі. Розвиток міжнародного ринку вантажних перевезень в ЄС напряду впливає на діяльність та організацію міжнародних перевезень в Україні. З 1 серпня 2017 року набула чинності «Угода про асоціацію між Україною та Європейським Союзом» [91], відповідно до цього Україна внесла зміни до законодавства в транспортному секторі, окрім цього в подальшому в транспортній політиці необхідно зважати на стратегічні пріоритети ЄС. Також Україна бере активну участь в програмах міжнародної співпраці між ЄС та країнами-партнерами, такими як ТРАСЕКА та будівництво мережі TEN-T. Україна має угоди з 45 країнами щодо міжнародних вантажних автоперевезень [92].

За останній час в Україні спостерігається позитивна тенденція розвитку транспортного сектору та виконання міжнародних вантажних перевезень. Збільшується частка присутності вітчизняних перевізників на міжнародних ринках. Але, не зважаючи на це, розвиток міжнародних вантажних перевезень стримується через невідповідність автопарку до екологічних норм ЄС [93], неповну нормативно-правову та законодавчу базу [94], відставання в розвитку автомобільних доріг, експлуатаційні показники транспортної системи не відповідають міжнародним стандартам [95], дефіцит дозволів на перевезення вантажів країнами ЄС [92]. Не менш важливим є питання проходження митниці. Непрозорість митних операцій, великий час проходження, високий рівень бюрократизації митних органів та корупції, велика кількість документації для проходження митного оформлення, несприятливі умови пунктів пропуску, відсутність сучасних інформаційних технологій, через це транспортні потоки оминають країну віддаючи перевагу більш сприятливим умовам перетину кордону [96].

В результаті проведених досліджень обсягу перевезень вантажів у міжнародному сполученні за 2017–2021 рік (рис. 1.5) показали, що найбільший сплеск був у 2019 році – 10108,82 тис. т [97]. В 2020 році через світову пандемію та карантинні заборони перевезення вантажів скоротилось на 21 % в порівнянні від 2019 року [98], а тарифи на перевезення в пік поширення пандемії зросли на 40 % [99]. Важливою проблемою для перевізників стала невизначеність в подальших діях надання транспортних послуг клієнтам та постійні оновлення в законодавчій структурі. Карантинні заходи загалом вплинули і на процес організації перевезень, змусивши транспортні компанії перейти від використання автоматизованих систем аналізу і управління попитом на ручне керування.

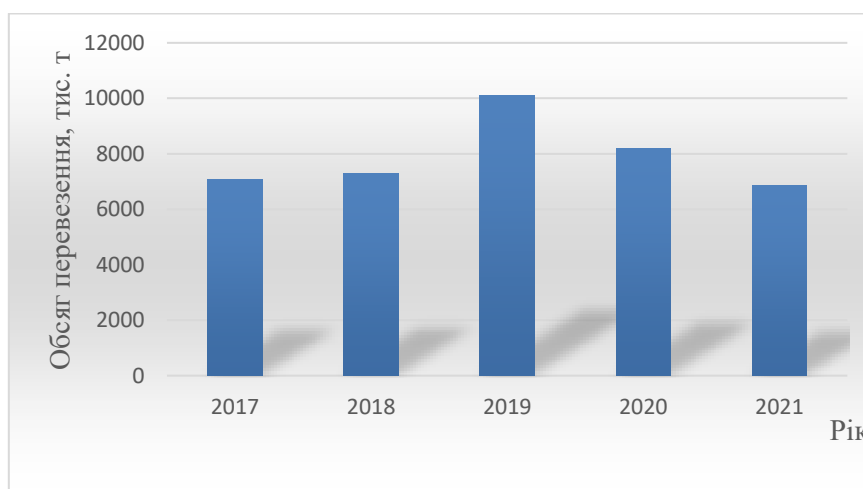


Рисунок 1.5 – Обсяг перевезення вантажів у міжнародному сполученні за 2017-2021 рік

Міжнародні вантажні перевезення займають значну частину торгівлі товарами між Україною та країнами ЄС. Починаючи з 2015 року ЄС залишається ключовим торговельним партнером України. У продовж 2020 року експорт становить 40,7 % від сумарного товарообороту, за 2021 рік експорт виріс до 51 % порівняно з попереднім роком. Частка автомобільного транспорту в експорті транспортних послуг до ЄС сягає близько 20 %. Основними країнами-експортерами є Польща, Німеччина, Угорщина,

Румунія, Італія та Чехія, а імпорту – Польща, Німеччина, Нідерланди, Словаччина та Угорщина [92].

В області міжнародних вантажних перевезень автомобільний транспорт має значніші обмеження присутності на міжнародному ринку у порівнянні з іншими видами транспорту. У роботі [92] визначено основні бар'єри виходу українських автоперевізників на міжнародний ринок. Серед них дефіцит дозволів на перевезення вантажів до країн ЄС, обмеження щодо тривалості перебування вітчизняних водіїв на території ЄС, корупційні ризики, зумовлені браком дозволів, значні черги під час проходження митного контролю через незадовільний технічний стан пунктів пропуску.

На початку 2022 року Україна отримала 703061 дозвіл на міжнародні вантажні перевезення, що на 84941 менше у порівнянні з попереднім роком [100]. Через дефіцит дозволів Україна починаючи з 2018 року втратила 500 мільйонів євро потенційних доходів від транспортної діяльності [101]. Автори [92] виділяють наступні фактори для збільшення кількості вітчизняних перевізників на міжнародному ринку:

- лібералізація міжнародних вантажних перевезень;
- уніфікація законодавства України в секторі транспорту до законодавства в ЄС;
- підвищення пропускної спроможності в пунктах пропуску, оснащення новітніми технологіями, підвищення прозорості митних процедур, зменшення часу та вартості проходження митного контролю;
- перехід до діджиталізації та електронного документооберту, підвищення прозорості видачі дозволів на міжнародні перевезення;
- підвищення екологічних стандартів у відповідності до вимог ЄС.

Починаючи з 24 лютого 2022 року повномасштабного вторгнення російської федерації на територію України та введення військового стану спричинило занепад, як економіки країни, так і, відповідно, транспортного сектору.

Калініченко О.П. в своїй статті [102] виділяє наступні наслідки російської агресії на території України в секторі транспорту та міжнародних перевезень – призупинено роботу морських портів, не відбувається експорт та імпорт продукції, функціонують лише три річкових порти, заблоковане функціонування повітряного транспорту, пошкодження залізничних колій та дорожнього покриття, руйнування мостів, недостатня кількість працівників через міграцію та мобілізацію, дефіцит пального, низька здатність пропускної спроможності митниці, знищення логістичних ланцюгів.

Вихід зарубіжних компаній з вітчизняного ринку призвів до зупинення транзитних перевезень територією України, зниження кількості транспортних одиниць негативно позначилося на стабільності логістичних ланцюгів і створило труднощі в організації гуманітарного забезпечення [103]. Війна в Україні впливає і на ринок транспортних послуг в ЄС, так спостерігається зменшення надання послуг з перевезень на 4 % [104]. За даними державної служби статистики за перше півріччя спостерігається плавне зменшення експорту на 20,3 % та імпорту на 19,6 % у відповідності до першого кварталу 2021 року [97].

Для продовження міжнародних економічних відносин та підтримки Україні в складний момент, вже в перші місяці військових дій росії на сході України, вдалося домовитися про тимчасове зупинення необхідності дозволів на міжнародні перевезення вантажів автомобільним транспортом з 12 країнами ЄС. А вже 29 червня 2022 року між Україною та ЄС була підписана «Угода про вантажні перевезення автомобільним транспортом» або так званий «транспортний безвіз» [105] терміном на 1 рік з можливістю подальшого продовження. Угода надає такі переваги вітчизняним перевізникам [106]:

- скасовує необхідність отримувати дозволи на міжнародні автомобільні перевезення;
- в європейських країнах набувають чинності українські права водія;

– відміна мита та тарифів при експорті вітчизняних товарів, що в свою чергу економить значні витрати підприємств-експортерів.

З 1 серпня 2022 року запускається використання електронних товаро-транспортних накладних, що прискорить обмін документами при проходженні митного контролю [107]. Планується на кінець 2022 року розпочати роботу в європейській системі NCTS [108], ця технологія дає можливість виконання транзитних перевезень територією ЄС без оформлення додаткових транзитно-транспортних документів, це дозволить представникам вітчизняного бізнесу та перевізникам підвищити присутність на європейських ринках, спрощує процес перевезення вантажу в міжнародному сполученні, підвищить економіку України через валютні надходження.

Микуляк О.В. [109] вважає що використання системи NCTS для України прискорить процес перевезення вантажів через швидке проходження митниці, також дає можливість України не відступати від запланованого вектору на євроінтеграцію, надає великі можливості в сукупності з використанням авторизованого економічного оператора (АЕО) та митних послаблень, для вітчизняного бізнесу особливо в сфері перевезення вантажів. Автор виділяє переваги використання системи NCTS:

- перевезення вантажів відбувається за однією транзитною декларацією;
- можливо доставляти товари без заїзду на митні термінали, це економить час та гроші;
- підвищується прозорість транзитних перевезень вантажів, як територією України так і ЄС;
- можливість запровадити новий фінансовий продукт в сфері транспорту – фінансову гарантію [110].

Незважаючи на критичну ситуацію в країні, Україна залишається євроінтеграційна та поступово просувається на європейський ринок.

1.3 Аналіз сучасних систем інформаційної підтримки прийняття управлінських рішень при міжнародних автомобільних перевезеннях

Для успішної організації вантажоперевезень, особливо в частині управління інформаційними потоками, ключову роль відіграють ІТ-системи. Їх широко застосовують у всіх сферах логістики, включно з транспортом, клієнтським сервісом, складуванням, управлінням запасами, закупівлями, проектуванням логістичних процесів і дистрибуцією. Сучасні ІТ-рішення, такі як ERP, WMS (система управління складом) і TMS (система управління транспортом), забезпечують інтеграцію всіх етапів логістичного ланцюга, підвищуючи прозорість і швидкість обробки даних [111]. Вони допомагають автоматизувати процеси, мінімізувати людські помилки, оптимізувати маршрути перевезень і скоротити витрати. Крім того, використання Big Data, IoT і штучного інтелекту дає змогу прогнозувати попит, контролювати стан вантажів у реальному часі та підвищувати рівень клієнтського сервісу. У результаті ІТ-системи не тільки забезпечують безперебійну роботу логістичних процесів, а й створюють конкурентну перевагу для компаній, роблячи їх діяльність більш ефективною і стійкою.

Впровадження ІТ-систем в організацію міжнародних перевезень дає низку ключових переваг, серед яких – зниження обсягів складських запасів, мінімізацію помилок у логістичних процесах, зменшення кількості паперових документів і скорочення кількості скарг, завдяки таким системам вдається оптимізувати маршрути перевезень, скоротити відстані, зменшити час проходження митниці, мінімізувати нульові пробіги і запобігти пошкодженню вантажів, що в свою чергу знижує рівень рекламаций. Додаткові переваги включають можливість проведення інвентаризації за допомогою мобільних додатків, зокрема віддалено, скорочення складських витрат завдяки підвищенню ефективності, поліпшення організації робочих процесів і головне, підвищення якості клієнтського сервісу завдяки запобіганню помилок під час комплектації замовлень.

Телематичні системи в поєднанні з системами управління транспортом (TMS) значно розширюють можливості планування та контролю виконання замовлень. TMS призначені насамперед для оформлення та опрацювання транспортних заявок усередині компанії, управління експедируванням, оптимізації маршрутів і призначення підрядників для перевезень [112]. Ключові переваги використання таких систем охоплюють ведення єдиної бази даних підрядників, централізоване управління документацією, автоматизований розрахунок рентабельності перевезень, а також зберігання та аналіз даних з водійських карток. Це дає змогу підвищити прозорість логістичних процесів, скоротити витрати і підвищити ефективність транспортних операцій.

Основні функції TMS [113, 114]:

- транспортне планування – автоматизація та оптимізація маршрутів, розрахунок найбільш вигідних схем перевезення;
- обробка замовлень – управління як повними завантаженнями вантажівок, так і збірними відправленнями, автоматичний розподіл вантажів;
- координація транспортної мережі – контроль усіх вузлів логістичного ланцюга, включно зі складами, перевалочними пунктами і терміналами;
- аналіз транспортних показників – збір даних про витрати, час доставки, завантаження транспорту та ефективність маршрутів;
- глобальний моніторинг транспорту – GPS-відстеження, прогнозування часу прибуття та контроль дотримання маршрутів;
- зв'язок із водіями – миттєвий обмін даними, надання інструкцій;
- автоматичне сповіщення клієнтів – надсилання статусів замовлень, прогнозування термінів доставки, рекомендації щодо оптимізації логістики;
- управління відправленнями – контроль всіх вхідних і вихідних вантажів, зниження простоїв і оптимізація завантаження транспорту;

- кліринг замовлень – автоматична перевірка, звірка і підтвердження заявок;
- фінансова звітність – створення аналітичних звітів, розрахунок вартості перевезень, управління бюджетами;
- автоматичне виставлення рахунків – прискорення розрахунків з перевізниками, мінімізація помилок при розрахунках.

Додаткові можливості TMS [115, 116]:

- інтеграція з WMS і ERP – забезпечення наскрізної автоматизації логістики;
- використання IoT – датчиків відстеження температури, вологості та інших параметрів вантажу в реальному часі;
- Big Data і AI-аналітика – предиктивне планування, аналіз великих даних для оптимізації логістики;
- оптимізація багатомодальних перевезень – управління всіма видами транспорту (авто, залізничний, повітряний, водний);
- контроль дотримання нормативів – відстеження відповідності вимогам законодавства та внутрішніх стандартів компанії.

Переваги впровадження TMS [113-116]:

- зниження транспортних та експедиторських витрат – завдяки ефективному використанню транспорту та скороченню порожніх рейсів;
- доступ до інформації в реальному часі – можливість миттєво реагувати на зміни в логістиці;
- мінімізація людських помилок – автоматизація знижує ймовірність помилок у розрахунках, маршрутизації та документообігу;
- комплексне управління транспортом – об'єднання всіх процесів в одній системі, прозорість і контроль;
- підвищення швидкості доставки – оптимізація маршрутів і координація перевезень дають змогу прискорити логістичні процеси;

– покращення клієнтського сервісу – прозорість замовлень, своєчасні повідомлення і прогнозовані терміни доставки.

TMS-системи стають невід'ємною частиною сучасної логістики, підвищуючи ефективність бізнесу і конкурентоспроможність компаній. Інтеграція з ERP, WMS, телематичними системами та IoT дає змогу створити єдиний цифровий простір, що забезпечує максимальний контроль і автоматизацію транспортних процесів.

WMS є програмним інструментом, що підтримує процес управління складом і сприяє прийняттю ефективних рішень [117]. Її грамотне застосування дає змогу компаніям підвищити свою конкурентоспроможність, ця система адаптована як для стандартних, так і для високостелажних складів, де особливо важливо оптимізувати управління складськими процесами. Саме тому WMS відіграє ключову роль у їх ефективній роботі. IT-рішення класу WMS призначені для організації та контролю складських операцій, у малих і середніх підприємствах WMS найчастіше використовується спільно з модулями продажів і обліку, виступаючи як основна система. У великих компаніях вона, як правило, інтегрується зі складнішими ERP-системами, що забезпечують управління всім підприємством.

WMS складається з безлічі функціональних модулів, кожен з яких вирішує певне завдання для ефективного управління складськими операціями [118, 119].

1. Карта складу – цей модуль допомагає візуалізувати розташування стелажів на складі, показуючи, які зони складу використовуються найефективніше. Він допомагає менеджерам і операторам краще орієнтуватися в просторі складу, скорочуючи час на пошуки товарів.

2. Складські замовлення і запаси на складах – цей модуль дає змогу керувати складськими замовленнями, такими як приймання товарів, їх видача, заміна або додавання товару в пункти збору. Також сюди входять операції зі збору піддонів і упаковок. Управління запасами дає змогу

відстежувати актуальні рівні товарів на складі, що важливо для підтримки правильного рівня запасів.

3. Динамічні локації – цей модуль надає можливість використання ротаційних груп товарів на палетних локаціях залежно від їхньої оборотності. Наприклад, товари з високою оборотністю розташовуються ближче до зон відвантаження, тоді як товари з низькою оборотністю на стаціонарних локаціях складу.

4. Генератор маршрутів – створює оптимальні маршрути для працівників складу, враховуючи такі параметри, як мінімальна відстань для переміщення товарів або мінімальний час для виконання замовлення. Це допомагає підвищити ефективність роботи складу і знизити витрати часу.

5. Монітор складу – цей модуль використовується для ведення статистики складських операцій. Менеджери можуть аналізувати ефективність роботи складу, відстежувати виконання операцій і виявляти можливі вузькі місця або області для поліпшень.

6. Ручна обробка складських замовлень – цей модуль підтримує роботу з ручними пристроями, такими як сканери штрих-кодів і RFID-мітки. Він дозволяє передавати інформацію в режимі реального часу в базу даних, забезпечуючи точність даних і прискорюючи процеси на складі.

Кожен із цих модулів працює синхронно, забезпечуючи вищий ступінь автоматизації та ефективності на складі, що критично для бізнесу в умовах сучасного логістичного ринку.

Система управління складом відіграє ключову роль у логістиці міжнародних перевезень, забезпечуючи ефективне управління запасами, скорочення витрат і підвищення швидкості обробки вантажів, а також враховує вимоги митного регулювання, податкових органів і логістичних операторів, є важливим інструментом у глобальному ланцюгу поставок, забезпечуючи високу прозорість, контроль і ефективність складських і логістичних операцій.

SCM (Supply Chain Management) дає змогу створити модель усієї логістичної мережі з урахуванням її обмежень. Ця модель служить для координації дій і планування руху матеріалів на всіх етапах ланцюга поставок [120]. На основі отриманої інформації відбувається балансування поставок і попиту, а також розробляються реалістичні плани закупівель, виробництва і логістики. На відміну від ERP-систем, SCM пропонує принципово інший підхід до управління процесами. Завдяки плануванню в реальному часі, передовим методам моделювання та інструментам оптимізації забезпечується висока гнучкість і адаптивність ланцюга поставок.

SCM відіграє ключову роль у міжнародній логістиці, забезпечуючи ефективну координацію поставок, зниження витрат і підвищення швидкості доставки. В умовах глобальної торгівлі SCM інтегрує процеси закупівель, виробництва, зберігання і транспортування, допомагаючи компаніям адаптуватися до мінливих умов ринку і мінімізувати логістичні ризики. Основними завданнями SCM у міжнародній логістиці є оптимізація маршрутів і видів транспорту, управління мультимодальними перевезеннями та автоматичне перенаправлення вантажів у разі виникнення затримок [121]. Найважливішим елементом є інтеграція з глобальними транспортними системами, що дає змогу зв'язати SCM із системами управління перевезеннями (TMS), митними службами та складськими терміналами, забезпечуючи автоматизацію оформлення документів і мінімізацію простоїв.

Завдяки SCM можливо прогнозувати попит та управляти запасами, що дає змогу компаніям адаптувати обсяги поставок і реалізовувати концепцію Just-In-Time, знижуючи витрати на зберігання. Однією з ключових функцій є контроль і моніторинг вантажів у реальному часі, що охоплює відстеження місця розташування товарів за допомогою IoT і RFID, а також контроль умов транспортування [122].

Гнучкість в управлінні ланцюга поставок досягається завдяки можливості оперативно змінювати маршрути та перевізників, розподіляти

запаси між складами залежно від потреб ринку. Важливу роль відіграє митне регулювання та відповідність міжнародним стандартам, що передбачає автоматичне заповнення декларацій, розрахунок мит та управління сертифікацією продукції.

SCM також дає змогу значно знизити витрати на логістику та підвищити ефективність завдяки вибору оптимальних транспортних засобів, управлінню завантаженням і мінімізації простоїв на складах і терміналах, взаємодія всіх учасників ланцюга поставок відбувається в режимі реального часу, забезпечуючи прозорість процесів і високу швидкість прийняття рішень. Використання SCM у міжнародних вантажоперевезеннях дає змогу скорочувати терміни доставки, знижувати витрати, оперативно реагувати на зміни ринку і забезпечувати високу надійність поставок, що робить його незамінним інструментом для управління глобальними логістичними процесами [123].

Впровадження діджитал-технологій у сферу міжнародних вантажоперевезень сприяє ефективній координації ланцюга поставок, оптимізації логістичних операцій і скороченню витрат на транспортування. Це досягається завдяки врахуванню особливостей глобальної транспортної мережі та митного регулювання. Аналіз програмних рішень на основі TMS, SCM и WMS, що використовуються для підвищення ефективності організації міжнародних перевезень, дав змогу виявити найпопулярніші з них. У таблиці 1.6 представлено основну концепцію ключових програмних продуктів, які спрощують процеси планування, координації та управління міжнародними перевезеннями.

Таблиця 1.6 – Характеристика сучасних програмних продуктів для управління транспортно-логістичними процесами

Програмний продукт	Основна мета
SAP Transportation Management (SAP TM)	Програмний продукт автоматизує транспортні процеси, вибір оптимальних маршрутів і перевізників, контроль витрат і управління мультимодальними перевезеннями
Blue Yonder	Програмне забезпечення для управління ланцюгами поставок, транспортуванням і складськими процесами. Воно використовує AI і машинне навчання для прогнозування попиту, оптимізації маршрутів, моніторингу перевезення вантажів в реальному часі та автоматизації складських процесів
Descartes TMS	Хмарна система для автоматизації управлінських рішень організації міжнародних перевезень, основні функції системи це автоматичний розподіл вантажів між перевізниками, розробка оптимальних маршрутів, сповіщує про затримки на маршруті, автоматичне опрацювання рахунків і перевірка тарифів та митного оформлення
Transporeon	Хмарна платформа для управління логістикою і транспортом, яка пов'язує вантажовідправників, перевізників і логістичні компанії в єдиній цифровій екосистемі. Основна мета – автоматизація процесів закупівлі транспортних послуг, управління ставками і відстеження поставок
Infor Nexus SCM	Хмарна платформа для управління ланцюгами поставок у режимі реального часу. Вона дає змогу компаніям синхронізувати закупівлю, виробництво, транспортування (контроль за перевізниками та дотриманням термінів, інтеграція з митними системами) і складську логістику, забезпечуючи повну прозорість усіх процесів
IBM Sterling Supply Chain Suite	Інтелектуальна хмарна платформа для управління ланцюгами поставок, що використовує штучний інтелект, машинне навчання, блокчейн і IoT. Вона допомагає компаніям – автоматизувати логістику та складську роботу, передбачати ризики та знижувати витрати, забезпечувати прозорість ланцюга поставок, оптимізувати транспортні маршрути, автоматизувати фінансові операції в логістиці. IBM Sterling використовує IBM Watson AI для передбачення збоїв, а також IBM Blockchain, що забезпечує захист і прозорість транзакцій у ланцюзі поставок
Körber (ex. HighJump) WMS	Автоматизація процесів відбору та пакування замовлень, інтеграція з роботизованими системами значно підвищує продуктивність і точність. Використання голосових технологій та інтеграція з автоматизованими системами мінімізують вірогідність людських помилок, покращуючи точність і прискорюючи обробку замовлень

Проведений аналіз дозволяє визначити мету і задачі дослідження. Метою дослідження є підвищення ефективності доставки вантажів у міжнародному сполученні шляхом розробки та вдосконалення методів, моделей та системи підтримки прийняття рішень в управлінні перевізним

процесом. Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити наступні задачі:

- проаналізувати сучасні підходи до організації міжнародних перевезень та обґрунтувати роль діджиталізації у підвищенні їх ефективності;
- розробити методичний підхід до вибору раціональної з чотирьох альтернативних схем доставки, що враховує декомпозицію логістичних витрат та специфічні ризики, з урахуванням оптимізації крос-докінгових операцій для ефективного управління ресурсами в умовах невизначеності та часових обмежень;
- розробити комплекс програмних інструментів для імітаційного моделювання та порівняльного аналізу сценаріїв доставки, аналізу ефективності крос-докінгу та автоматизованої побудови спільних операційних графіків;
- провести експериментальні дослідження та дослідити вплив ключових факторів на ефективність різних схем доставки для підприємств різного розміру, розробити практичні рекомендації з оптимізації логістичних процесів на основі концепції адаптивного управління.

Об'єкт дослідження – процес організації та управління міжнародними автомобільними перевезеннями вантажів.

Предмет дослідження – методи, моделі та системи підтримки прийняття рішень для підвищення ефективності міжнародних вантажних перевезень.

1.4 Висновки по розділу 1

1. Проведений аналіз світових тенденцій розвитку транспортної галузі засвідчив, що ключовим фактором забезпечення конкурентоспроможності та ефективності міжнародних вантажних перевезень є глобальна діджиталізація та впровадження інновацій. Визначено, що інтеграція таких технологій, як

Інтернет речей (IoT), блокчейн, хмарні обчислення та електронний документообіг (зокрема e-CMR), дозволяє трансформувати традиційні логістичні ланцюги в інтелектуальні системи. Це забезпечує прозорість процесів, мінімізацію впливу людського фактора та оптимізацію витрат. Водночас встановлено, що стримуючими факторами діджиталізації залишаються висока вартість впровадження, ризики кібербезпеки та необхідність уніфікації програмних стандартів між країнами-партнерами.

2. Дослідження стану ринку міжнародних автоперевезень України виявило, що галузь функціонує в умовах критичного навантаження, спричиненого повномасштабним військовим вторгненням, руйнуванням традиційних логістичних маршрутів та блокуванням інших видів транспорту. Позитивним драйвером змін визначено підписання «транспортного безвізу» з ЄС та приєднання до системи спільного транзиту (NCTS), що відкриває нові можливості для вітчизняних перевізників. Однак критичний аналіз існуючих науково-методичних підходів до вибору транспортно-технологічних схем доставки показав їхню обмеженість – більшість з них базуються виключно на критерії мінімізації витрат, не враховуючи належним чином фактори часу та специфічні ризики (в тому числі військові), що вимагає розробки нових адаптивних методів управління в умовах невизначеності.

3. Аналіз інструментарію інформаційної підтримки (TMS, WMS, SCM систем) підтвердив їхню важливість для автоматизації планування, моніторингу та управління ресурсами в міжнародній логістиці. Встановлено, що сучасні програмні продукти (SAP TM, Oracle, та інші) ефективно вирішують задачі операційного рівня, проте існує дефіцит комплексних систем підтримки прийняття рішень, які б інтегрували функції вибору раціональної схеми доставки з урахуванням динамічних ризиків та оптимізації складських процесів, зокрема крос-докінгу. Це обґрунтовує необхідність створення спеціалізованого програмного забезпечення, здатного

моделювати сценарії доставки та синхронізувати роботу учасників перевізного процесу в єдиному інформаційному просторі.

РОЗДІЛ 2

ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ ВИБОРУ МЕТОДУ ОРГАНІЗАЦІЇ МІЖНАРОДНИХ АВТОМОБІЛЬНИХ ПЕРЕВЕЗЕНЬ

2.1 Інформаційно-технологічне забезпечення міжнародних вантажних перевезень

Транспортний сектор відіграє важливу роль в економічному розвитку країни, забезпечуючи її стабільне функціонування та інтеграцію на міжнародні ринки. Одним із ключових напрямів є автомобільний транспорт, який вирізняється високою швидкістю доставки, безпекою, мобільністю, гнучкістю маршрутів, можливістю перевезення вантажів за принципом «від дверей до дверей» і регулярністю поставок.

В Україні автомобільні перевезення займають значну частку в логістичній системі, сприяючи розвитку торгівлі, промисловості та експорту. Особливо важливим напрямком є міжнародні перевезення, які забезпечують ефективну взаємодію із зарубіжними партнерами, сприяють залученню інвестицій та підвищенню конкурентоспроможності вітчизняних товарів на світовому ринку. Розвиток інфраструктури, діджиталізація логістичних процесів і впровадження екологічно чистих технологій також відіграють ключову роль у модернізації транспортного сектору та його адаптації до сучасних вимог глобальної економіки [124].

В умовах стрімкого розвитку інформаційних технологій, інновації набувають особливої значущості, охоплюючи всі сфери діяльності сучасного суспільства. Транспортний сектор, особливо міжнародні перевезення, активно впроваджує системи відстеження, електронні ідентифікатори та цифрові платформи (рис. 2.1). Загострення конкуренції на транспортному ринку робить традиційні методи малоефективними або зовсім марними, тому ключовим фактором конкурентної переваги стає здатність до впровадження інновацій.

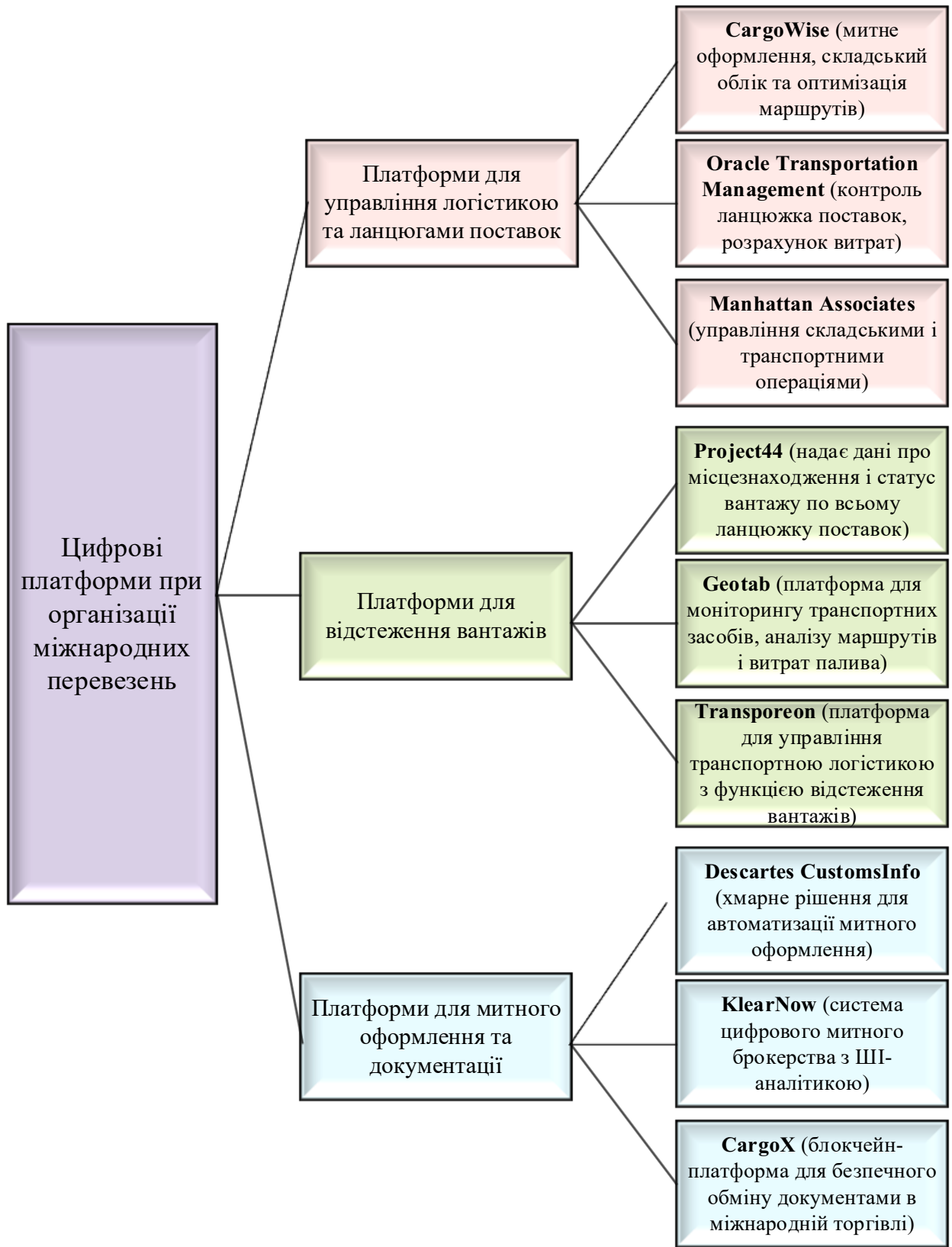


Рисунок 2.1 – Використання цифрових платформ при організації міжнародних перевезень

Діджиталізація процесів, автоматизація управління логістичними операціями та інтеграція інтелектуальних систем дають змогу компаніям

знижувати витрати, підвищувати швидкість і точність доставки, а також забезпечувати прозорість ланцюгів поставок. Адаптація до нових технологічних тенденцій і цифрових стандартів не тільки сприяє зміцненню позицій вітчизняних перевізників на глобальному ринку, а й відкриває нові можливості для розширення бізнесу, підвищення клієнтського сервісу та інтеграції в міжнародні логістичні екосистеми.

Використання діджитал-технологій, оцифрованих даних і нейромереж на базі штучного інтелекту відкриває широкі можливості для підвищення ефективності управління та прийняття рішень у сфері міжнародних автомобільних перевезень. Це, своєю чергою, сприяє зниженню фінансових витрат [125]. Особливістю цифрової трансформації транспортної галузі є нерівномірне впровадження інновацій у різних напрямках. Однак, незважаючи на це, існує значний попит на цифрові технології, і їхнє активне застосування стимулює зростання економічної ефективності в транспортній сфері.

Технологія Інтернету речей надає широкі можливості у сфері міжнародних вантажоперевезень, значно підвищуючи конкурентоспроможність транспортних компаній і покращуючи якість послуг, що надаються. Інтеграція IoT в логістичні процеси дає змогу не тільки контролювати пересування транспортних засобів та їхнє місце розташування в режимі реального часу, а й відстежувати важливі параметри всередині вантажного відсіку, такі як температура, вологість та інші умови, що впливають на збереження вантажу. Використання IoT сприяє підвищенню ефективності логістичних ланцюгів, мінімізації втрат, автоматизації процесів і зниженню операційних витрат. Завдяки технологіям віддаленого моніторингу та аналізу даних компанії можуть швидше реагувати на непередбачені ситуації, покращувати планування маршрутів і забезпечувати високий рівень безпеки перевезень.

У IoT можна виокремити чотири ключові рівні функціонування [126]:

- рівень збору даних охоплює різні сенсори, виконавчі механізми та RFID-мітки, які фіксують інформацію про стан вантажу і транспортного засобу;
- мережевий рівень відповідає за передачу даних через Інтернет або інші комунікаційні канали, забезпечуючи надійний зв'язок між пристроями;
- сервісний рівень використовує проміжне програмне забезпечення, що дає змогу інтегрувати різні сервіси та додатки для опрацювання даних і керування процесами;
- рівень інтерфейсу надає користувачам доступ до інформації, візуалізує дані та дає змогу взаємодіяти з системою для контролю та ухвалення рішень.

Таким чином, впровадження IoT у сферу вантажоперевезень не тільки підвищує ефективність управління транспортними потоками, а й сприяє розвитку інтелектуальних логістичних рішень, покращуючи клієнтський сервіс і створюючи нові можливості для бізнесу.

Для підвищення ефективності міжнародних вантажоперевезень необхідно інтегрувати хмарні технології, які забезпечують централізоване управління інформаційним обміном у режимі реального часу між усіма учасниками транспортного процесу. Це дає змогу підвищити прозорість операцій, мінімізувати затримки, знизити ризики помилок і оперативно реагувати на зміни в логістичному ланцюжку. Важливим аспектом є обробка великих обсягів даних, що сприяє ухваленню оптимальних управлінських рішень, підвищенню точності прогнозування, зниженню витрат і поліпшенню координації між учасниками перевезення. Система підтримки управлінських рішень у міжнародних вантажоперевезеннях орієнтована на ключових учасників логістичного процесу, включно з вантажовідправниками, вантажоодержувачами, транспортними компаніями, логістичними центрами, митними службами, державними органами та фінансовими установами (рис. 2.2).

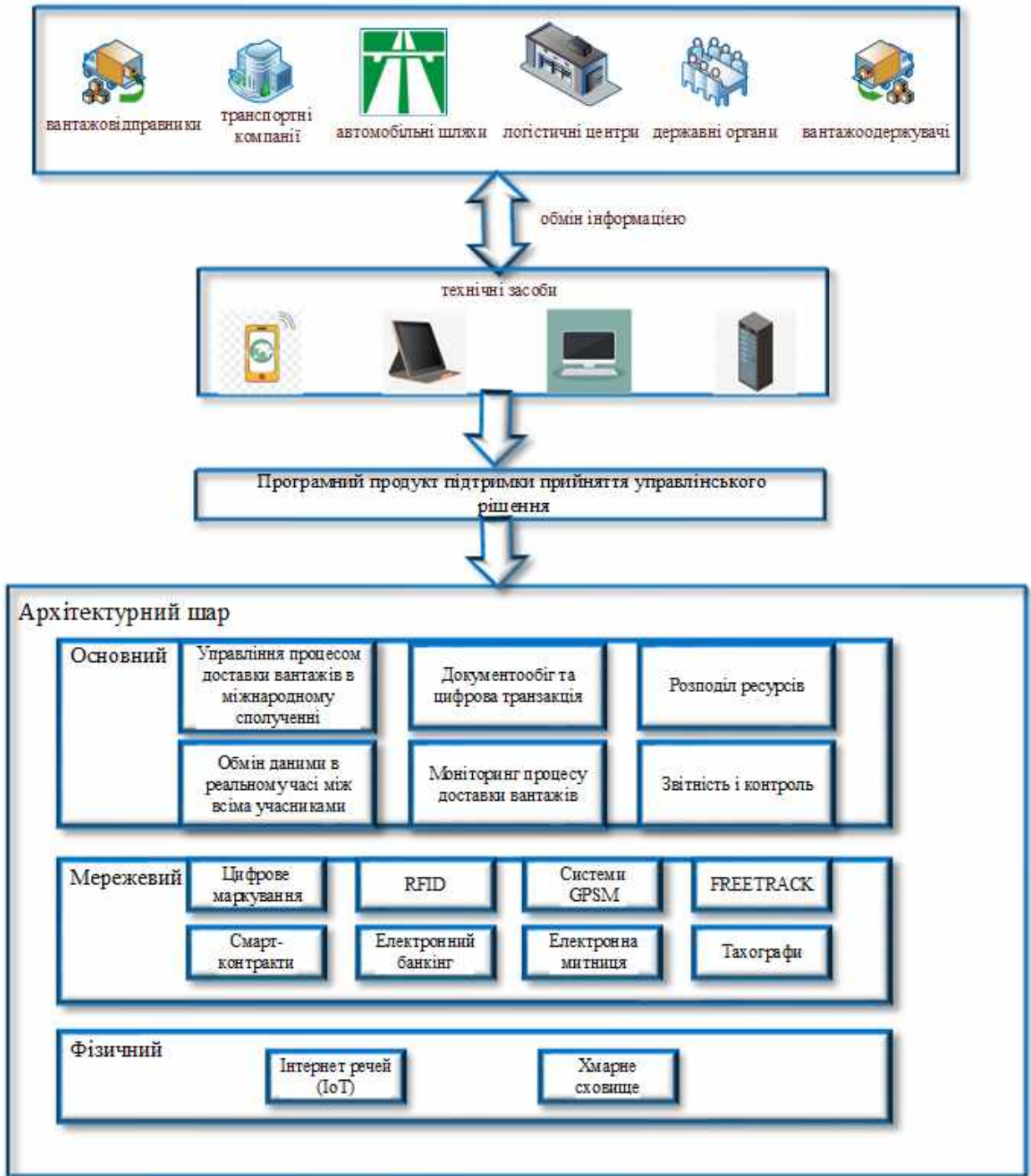


Рисунок 2.2 – Схема інтегрованої системи підтримки прийняття управлінського рішення при організації та управлінні доставкою вантажів в міжнародному сполученні

Вона дає змогу автоматизувати і спростувати контроль на всіх етапах перевезення – від планування маршруту та оформлення документації до моніторингу переміщення вантажу і виконання вимог законодавства.

Впровадження таких технологій сприяє підвищенню швидкості опрацювання вантажів, поліпшенню взаємодії між сторонами і скороченню часу простою транспорту, що в підсумку підвищує ефективність всієї логістичної системи.

Після успішної аутентифікації клієнта в програмній системі відбувається процес обробки замовлення на перевезення. Клієнт отримує підтвердження про прийняття заявки в обробку, транспортна компанія оцінює доступність ресурсів і підтверджує готовність виконати перевезення, після чого за допомогою IoT-сервісу обговорюються всі ключові деталі доставки вантажу, включаючи терміни, умови транспортування, додаткові вимоги та рахунок що виставляється (Invoice). Такий підхід дозволяє автоматизувати взаємодію між учасниками логістичного ланцюжка, мінімізувати ризики затримок та підвищити прозорість виконання замовлення.

Програмний продукт включає кілька ключових модулів (рис. 2.3), кожен із яких відповідає за певні етапи транспортного процесу:

- планування забезпечує вибір доцільного транспортного засобу з урахуванням характеристик вантажу (вага, розмір, вимоги до температурного режиму, та інших). Також розробляється раціональний маршрут руху, враховуючи погодні умови, стан дорожньої інфраструктури, пропускну здатність пунктів митного контролю та логістичних центрів, заправних станцій, та можливих обмежень на шляху прямування («війкового ризику»). Визначають графіки руху та роботи і відпочинку для водіїв;

- документообіг та звітність дозволяє автоматизувати процес обміну даними між усіма учасниками логістичної мережі та державними органами. У рамках цього модуля здійснюється підписання договорів, оформлення транспортних та митних документів (CMR, накладні, страховка, сертифікати відповідності), підготовка звітності по всіх етапах перевезення, а також відстеження платежів та інших грошових транзакцій.

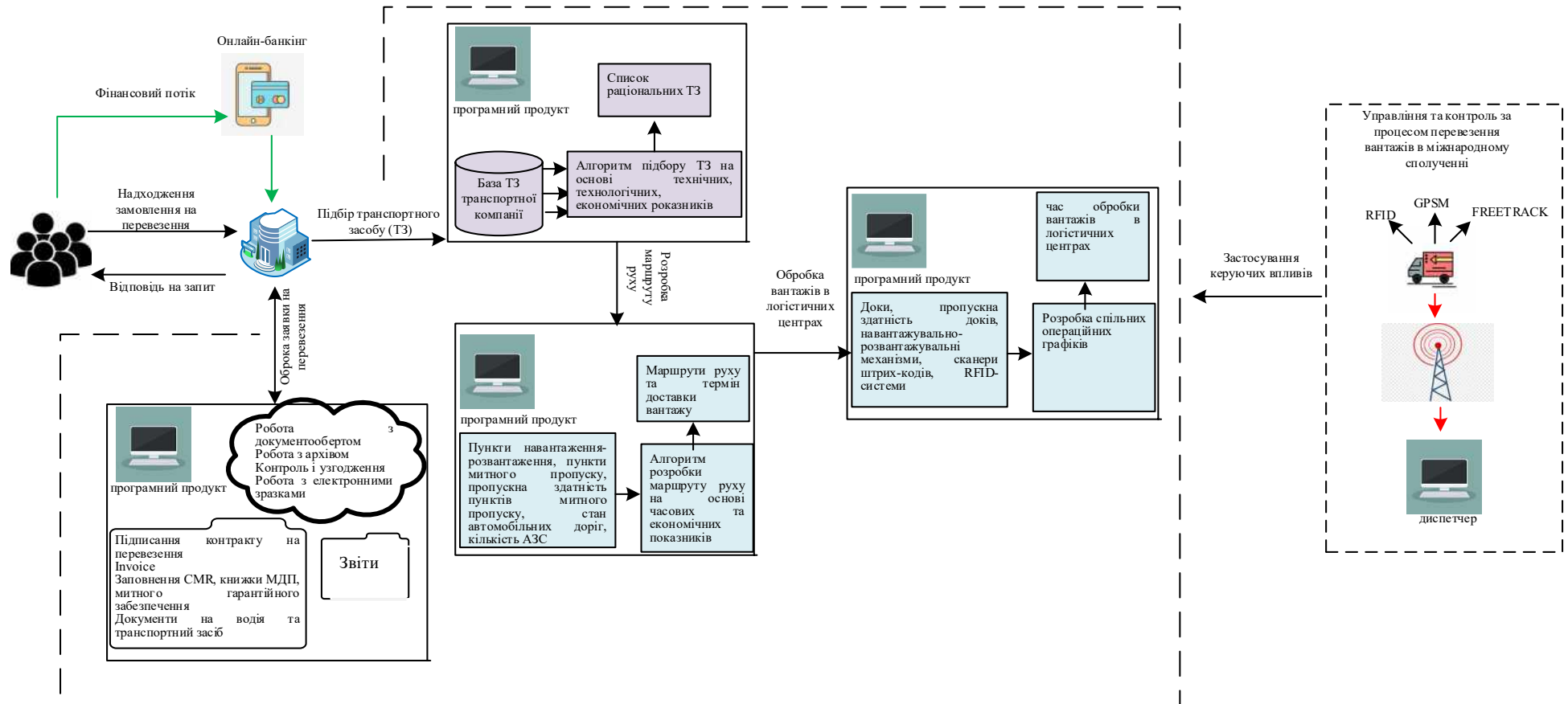


Рисунок 2.3 – Схема взаємозв'язків інтегрованої системи підтримки прийняття управлінського рішення

Клієнт отримує своєчасні повідомлення про статус обробки документів, що дає змогу оперативно усувати можливі затримки;

- управління та моніторинг забезпечує контроль місцезнаходження вантажу в режимі реального часу з використанням GPS та RFID-технологій. Цей модуль дозволяє відстежувати стан вантажу, включаючи температуру в рефрижераторних контейнерах, рівень вібрації, вологість та інші показники, критично важливі при перевезеннях чутливих товарів. У разі виникнення непередбачених обставин (аварії, зміни погодних умов, затримки на кордоні) система автоматично аналізує ситуацію та пропонує альтернативні маршрути чи коригувальні дії;

- обробка вантажів в логістичних центрах дозволяє ефективно управляти системою завантаження та розвантаження доків, визначається кількість доків на основі завантаженості центру і типів вантажів, вибираються оптимальні точки розвантаження з урахуванням типу транспорту. Розробляються маршрути пересування вантажів, що виключають конфлікти між транспортними потоками. Оптимізується час прибуття кожного транспортного засобу до доку для зменшення неефективних простоїв.

2.2 Моделювання та оптимізація логістичних операцій на основі технології крос-докінгу

Ефективна організація роботи складського господарства, як невід’ємної частини логістичного ланцюга, відіграє ключову роль у міжнародних перевезеннях вантажів, забезпечуючи ефективне планування переміщення вантажів між країнами, управління міжнародними вантажопотоками, підвищення рівня збереження вантажів, що транспортуються протягом значного часу, та загальну оптимізацію логістичних процесів.

Саме ефективна робота складського господарства при міжнародних перевезеннях вантажів забезпечує наступні переваги:

- зниження транспортних витрат, завдяки об'єднанню вантажів в одну партію (консолідації) зменшується необхідна кількість перевезень та ефективніше використовується вантажопідйомність транспортних засобів. Це також призводить до скорочення витрат на митне оформлення, оскільки консолідований вантаж проходить контроль як єдине відправлення, що економить кошти та час;

- скорочення часу обробки вантажів на складах, раціональне виконання вантажно-розвантажувальних робіт, оптимізація основних складських процесів (швидке приймання, ефективне зберігання, обробка та відправлення), використання сучасних технологій, автоматизація управління складом, автоматична ідентифікація та електронний документообіг дозволяють зменшити час перебування вантажів на складі та пришвидшити їх доставку в міжнародному сполученні;

- покращення безперебійності поставок та управління запасами, автоматизація логістичних процесів, застосування систем прогнозування попиту, розширення мережі партнерів-постачальників та впровадження дієвих стратегій управління запасами забезпечують контроль наявності товарів, планування поставок та знижують ризик виникнення надлишків або дефіциту, що гарантує стабільність поставок;

- зменшення непродуктивних витрат часу та фінансових втрат, застосування технології крос-докінгу та наявність митно-ліцензійного складу дозволяють оптимізувати процес доставки, здійснювати розмитнення товарів за потребою або взагалі його уникати при транзиті під митним контролем. Крім того, це надає можливість перепродажу товарів з коригуванням їх вартості та зміною продавця чи покупця.

Крос-докінг являє собою дієву логістичну технологію, яка зводить до мінімуму або повністю усуває необхідність зберігання товарів на складі, забезпечуючи їхнє оперативне перевантаження з одного транспортного засобу на інший. В Україні ця практика стає все більш популярною, особливо в галузі міжнародних перевезень, роздрібної торгівлі та електронної комерції.

Згідно з дослідженнями ринку логістики [127] у 2023 році обсяг українського ринку складської логістики перевищив 2,5 мільярда доларів США, демонструючи щорічне зростання на 10–15 %. Частка операцій крос-докінгу в загальному обсязі вантажоперевезень також показує позитивну динаміку, особливо в сегментах товарів повсякденного попиту (FMCG), електронної комерції та роздрібною торгівлі. Основною причиною такого зростання є розвиток великих онлайн-платформ, таких як Rozetka, Prom.ua та Epicentr, що стимулює потребу в швидкій доставці товарів без тривалого зберігання.

Крім того, важливу роль у розвитку крос-докінгу в Україні відіграє міжнародна інтеграція країни. Угода про асоціацію з Європейським Союзом та зміцнення торговельних зв'язків з європейськими країнами сприяють підвищенню стандартів логістики. Зростання обсягів міжнародної торгівлі, імпорту та експорту підштовхує до впровадження швидких логістичних рішень.

Зважаючи на зростаючу потребу в швидкій та дієвій логістиці, крос-докінг в Україні має великі перспективи. Прогнозується, що протягом найближчих 3-5 років його популярність зростатиме завдяки активному інвестуванню в логістичну інфраструктуру, цифровізації процесів та включенню України до міжнародних ланцюгів поставок.

Розширення мережі митно-логістичних терміналів, створення сучасних митних складів та логістичних центрів зумовлює потребу у впровадженні ефективних технологій обробки вантажів. Розробка новітніх технологій та методів оптимізації роботи складських систем з використанням крос-докінгу стає особливо важливою в умовах нестачі ресурсів.

Дефіцит складських приміщень є однією з основних проблем у сфері логістики. У зв'язку з ростом бізнесу та збільшенням обсягів вантажоперевезень зростає потреба в складських площах, і пошук достатнього простору стає дедалі складнішим. Ця проблема особливо гостро постає під час пікових навантажень, коли склади переповнені, а нестача

місця спричиняє затримки в обробці вантажів та збільшує витрати. Крім того, через зростання цін на оренду складських приміщень та логістичних центрів компанії змушені шукати альтернативні способи ефективного використання наявних площ.

Оптимізація зберігання за допомогою сучасних технологій, таких як автоматизовані стелажні системи, роботизовані комплекси та програмне забезпечення для управління складом, сприяє максимально ефективному використанню доступного простору. Важливе значення також має раціональне зонування складських приміщень, застосування крос-докінгу для скорочення часу зберігання та інтеграція складів з транспортними системами для прискорення руху товарів.

При оптимізації роботи складу авторами в роботах [128, 129] було запропоновано використання високоманеврених і енергоефективних автомобілів та алгоритм побудови безконфліктних маршрутів руху транспортних засобів що дозволило підвищити продуктивність роботи засобів механізації та скоротити час на навантажувально-розвантажувальні операції, та представлено методологію розроблення та впровадження технології, що дає змогу визначити оптимальну кількість нових високоманеврених і енергоефективних автомобілів, розрахунки показали, що використання цього підходу сприяє зниженню собівартості технологічної обробки вантажів.

Питання, пов'язані з організацією крос-докінгових операцій, як правило, розглядаються в контексті завдань планування або інтеграції в ширшу транспортно-логістичну мережу. При цьому враховуються як часові характеристики, так і вплив структурних зв'язків усередині ланцюгів поставок. На рівні оперативного управління особлива увага приділяється розв'язанню завдань, пов'язаних зі складанням розкладів включно з [130 – 132]:

- розподілом вантажних автомобілів за біфункціональними док-дверями, завдання яке потребує високої точності координації прибуття та відправлення транспорту;
- визначенням оптимальної послідовності навантажувально-

розвантажувальних операцій з урахуванням пріоритетів оброблення вантажів та мінімізації простоїв;

- організацією внутрішньоскладської логістики, яка є особливо актуальною для великих терміналів, які обслуговують.

На тактичному рівні, який передбачає планування на більш тривалий горизонт (місяць або квартал), основними завданнями є [133, 134]:

- раціональний розподіл доків з урахуванням специфіки оброблюваних вантажів, вимог клієнтів і параметрів логістичної інфраструктури;

- ефективне використання ресурсів, зокрема робочої сили та транспортних засобів, із метою запобігання задержкам і підвищення загальної продуктивності терміналу.

Ефективне управління призначенням доків у крос-докінгових терміналах істотно впливає на продуктивність логістичних процесів, зниження витрат і мінімізацію кількості зайвих операцій. Такі центри відіграють ключову роль у сучасних ланцюгах постачань, забезпечуючи швидке та ефективне перевантаження товарів між вхідними та вихідними транспортними потоками без необхідності зберігання [135].

Моделі, орієнтовані на оптимізацію призначення доків, дають змогу не тільки поліпшити показники обробки, а й сприяють зниженню енерговитрат і операційних витрат. Зокрема, сучасні підходи [136] виходять за рамки традиційних метрик, такі як загальний час оброблення або довжина маршрутів, і включають цілі, пов'язані зі стійким розвитком і зниженням впливу на навколишнє середовище.

Деякі дослідники [137] пропонують підходи, що допускають часткове розвантаження і навантаження одного і того ж транспортного засобу, без суворого поділу вхідних і вихідних доків. Такі завдання формуються як завдання змішаного цілочисельного лінійного програмування, де метою є мінімізація часу виконання операцій. Для їх розв'язання застосовують гібридні евристичні методи, що поєднують складні структури сусідства з елементами

механізмів, що навчаються.

Крос-докінг являє собою сучасний метод організації логістичних процесів, що застосовується у вантажних терміналах з метою підвищення ефективності функціонування складської та транспортної інфраструктури. Основний принцип цього підходу полягає в мінімізації часу знаходження вантажу на складі за рахунок прямої передачі вантажів від вхідного потоку до вихідного. У рамках цієї технології вантаж, що надходить на вхідний док (зона розвантаження автомобілів, які прибувають для здавання вантажу), без тривалого зберігання або з мінімальним перебуванням на складі, негайно перерозподіляється та прямує до вихідного дока (зона навантаження автомобілів, які здійснюють подальшу доставку). Цикл обробки вантажу в системі крос-докінгу, як правило, не перевищує 24 годин. Загальну схему реалізації операцій крос-докінгу наведено на рисунку 2.4.

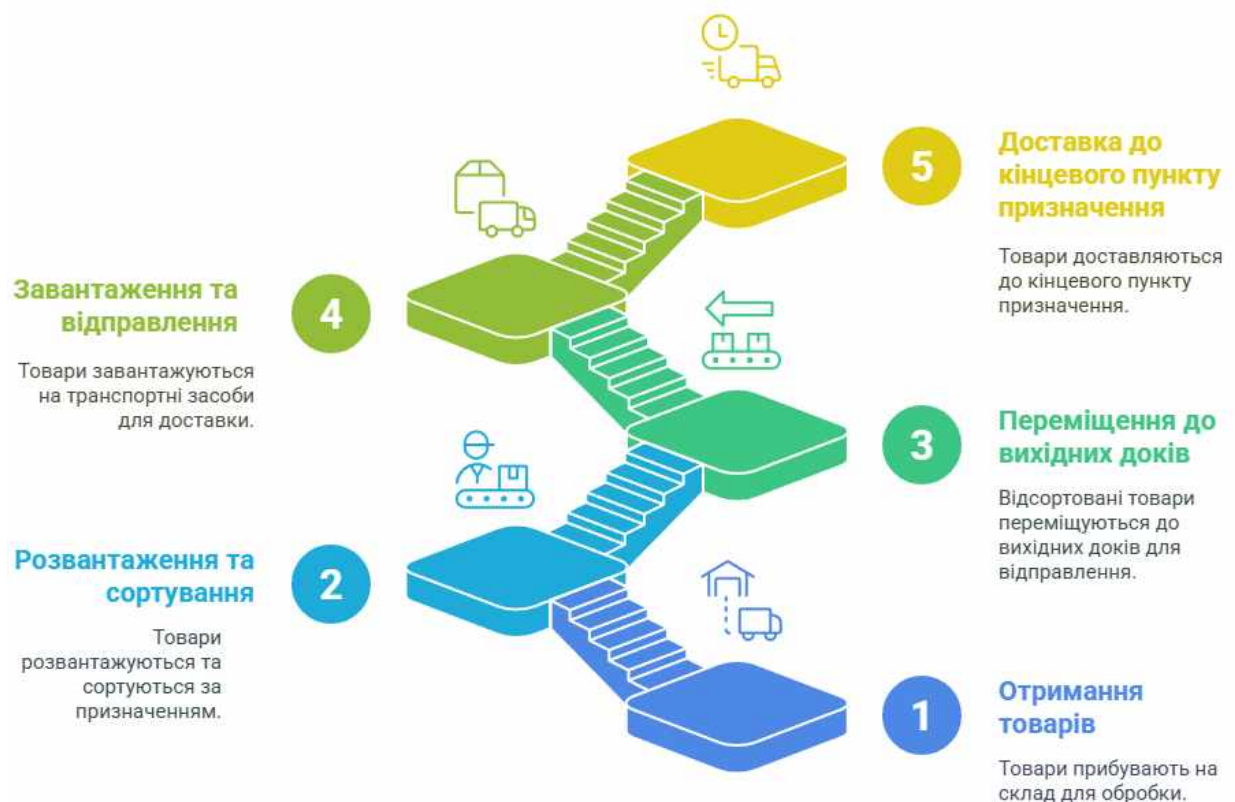


Рисунок 2.4 – Загальна схема операцій крос-докінгу

Для можливості виконання технологічних операцій крос-докінг потребує ідеальної координації вхідних і вихідних потоків на логістичних платформах у невизначених умовах. Невизначені умови при організації крос-докінгу в міжнародних перевезеннях можуть включати наступні чинники (рис. 2.5):

- затримки на митниці – непередбачувані терміни проходження митного контролю через перевірки, зміни в законодавстві або технічні проблеми;
- нестабільність транспортних графіків – можливі затримки вантажного транспорту через погодні умови, технічні несправності, черги на кордонах або інші логістичні ускладнення;
- зміни попиту та пропозиції – раптове коригування замовлень, зміна кінцевого одержувача або необхідність перенаправлення вантажу на інший склад;
- фактор людського впливу – помилки в документації, некоректне планування або недостатня координація між учасниками логістичного ланцюга;
- обмеженість складських і перевалочних потужностей – нестача місця або обладнання для швидкого перевантаження вантажів;
- регуляторні зміни та форс-мажори – раптові зміни у митних правилах, санкції, страйки, військові конфлікти, епідемії тощо.

Всі ці фактори потребують гнучкого управління логістичними процесами, прогнозування ризиків і швидкої адаптації до змін, щоб забезпечити ефективний крос-докінг у міжнародних перевезеннях. Тому важливою задачею наукових досліджень крос-докінгу є зосередження на умовах невизначеності та обмеженості ресурсів.

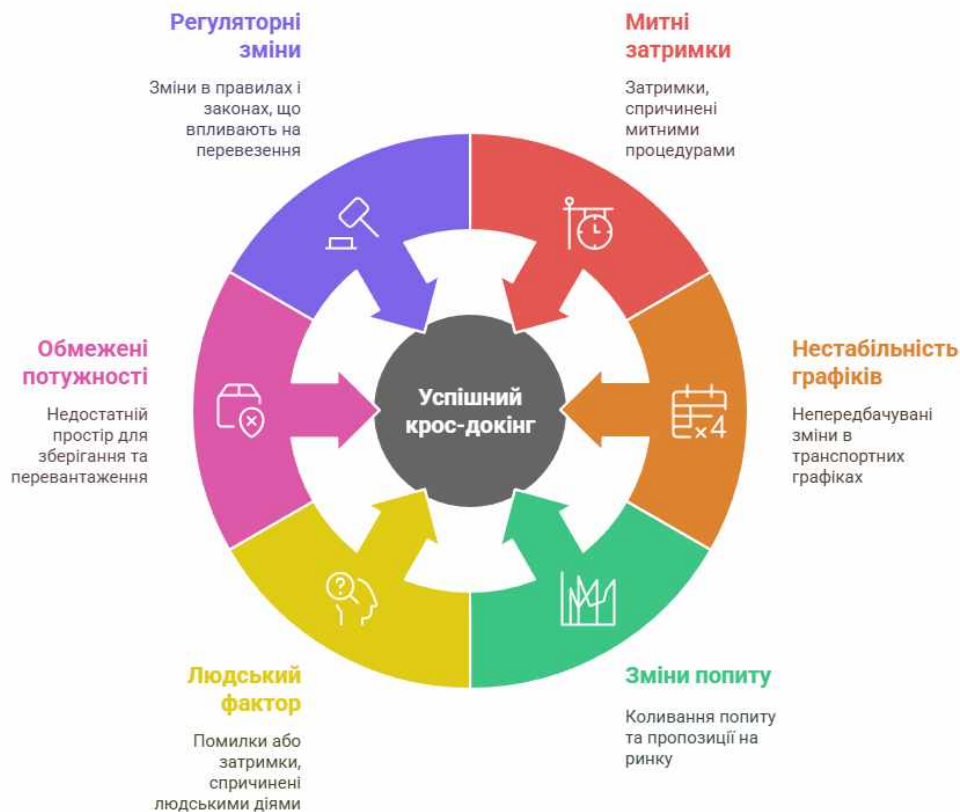


Рисунок 2.5 – Невизначені умови при організації крос-докінгу в міжнародних перевезеннях

Нехай задана множина $A=\{1,...,N\}$, що представляє собою набір вантажних транспортних засобів, що потребують навантаження або розвантаження на складі при забезпеченні операцій з крос-докінгу, та множина $D=\{1,...,D\}$, що представляє собою набір біфункціональних док-дверей (постів навантаження-розвантаження). Множина $P=\{1,...,R\}$ представляє собою ресурси в межах крос-дока (кількість обладнання, кількість працівників) необхідні для забезпеченні операцій з крос-докінгу. В цьому випадку для кожного з транспортних засобів що потребують навантаження, або розвантаження існує набір сценаріїв використання ресурсів $S=\{1,...,C\}$, з яких не більше одного буде обрано для планування обслуговування відповідного транспортного засобу. Часові характеристики процесу обслуговування визначаються часом прибуття транспортного засобу, часом виконання операцій з навантаження-розвантаження, часом

маневрування на території складу та відповідним максимальним часом найпізнішого відправлення зі складу.

У загальному вигляді кожен транспортний засіб може належати різним замовникам, та за затримку його у випадку невикористання простою в очікуванні обслуговування можуть нараховуватись штрафні санкції. Вартість штрафу може нараховуватись за час простою та за збій обслуговування у випадку відмови у навантаженні або розвантаженні. Необхідно мінімізувати вартість обслуговування транспортних засобів та вартість очікування кожного окремого транспортного засобу, або вартість збою обслуговування.

Для ефективної організації логістичних операцій в умовах обмежених ресурсів і часових обмежень пропонується модель оптимізації, спрямована на мінімізацію сумарних витрат B_{zag} , пов'язаних з обробкою вхідних і вихідних вантажних транспортних засобів на складі. Оптимізація здійснюється з урахуванням обмеженості числа біфункціональних дверей доку (можуть обслуговувати як вхідні, так і вихідні вантажівки), ресурсних обмежень (робоча сила, навантажувально-розвантажувальна техніка, транспорт), технологічних залежностей між вхідними та вихідними поставками (наприклад, вихідна вантажівка може бути завантажена лише після прибуття певних вхідних поставок), і різними сценаріями обслуговування, що розрізняються за часовими характеристиками та необхідними ресурсами.

$$\begin{aligned}
 B_{zag} = & \sum_{a=1}^A \sum_{d=1}^D \sum_{t=1}^T \sum_{s=1}^S x_{adts} \cdot (t_i - t_d) \cdot \kappa_{uid} + \sum_{a=1}^A \sum_{d=1}^D \sum_{t=1}^T \sum_{s=1}^S t_{obad} \cdot x_{adts} \cdot \kappa_a + \\
 & + \sum_{i=1}^n T_{z\delta_i} \cdot \kappa_{z\delta_i} + \sum_{i=1}^n T_{p\delta_i} \cdot \kappa_{p\delta_i} + \sum_{i=1}^n T_{n\delta_i} \cdot \kappa_{n\delta_i} + \sum_{d=1}^D C_d \cdot t_{obcd} \cdot y_d,
 \end{aligned}
 \tag{2.1}$$

де x_{adts} – бінарна змінна, що може приймати значення 1 – якщо вантажний автомобіль a призначено в док d саме в цей момент t при різних сценаріях s , або 0 – у протилежному випадку;

- t_i – момент надходження i -ої заявки на обслуговування, год.;
 t_{∂} – момент готовності доку ∂ , год.;
 $\kappa_{u\partial}$ – вартість очікування обслуговування в доці ∂ , грн/год.;
 C_{∂} – вартість використання доку ∂ , грн/год.;
 $t_{обс\partial}$ – загальний час використання доку ∂ , год.;
 y_{∂} – що може приймати значення 1, якщо док ∂ використовується, та 0 – якщо док ∂ вільний;
 $t_{обад}$ – час обслуговування автомобіля a у двері дока ∂ , год.;
 κ_a – вартість обслуговування автомобіля a , грн/год.;
 $T_{зб_i}$ – час зберігання i -го вантажу, год.;
 $\kappa_{зб_i}$ – вартість зберігання i -го вантажу, грн/год.;
 $T_{p\epsilon_i}$ – час раннього виїзду авто з крос-докінгу, год.;
 $\kappa_{p\epsilon_i}$ – штраф за ранній виїзд, грн.;
 $T_{n\epsilon_i}$ – час затримки виїзду автомобіля з крос-докінгу, год.;
 $\kappa_{n\epsilon_i}$ – штраф за затримку виїзду автомобіля з крос-докінгу, грн.
 Кожному автомобілю a назначається один док ∂

$$\sum_{i=1}^n x_{a\partial ts} = 1, \forall a \in A, \quad (2.2)$$

$$\sum_{i=1}^n y_{\partial \epsilon ts} + y_{\kappa \partial} = |D|, \quad (2.3)$$

де $y_{\partial \epsilon ts}$ – бінарна змінна, що може приймати значення 0 – якщо док зайнятий, або 1 якщо док вільний у момент часу t при сценарії s ;

$y_{\kappa \partial}$ – кількість вільних доків, од.

Для кожного автомобіля a обирають один сценарій s обслуговування з

можливих (стандартне, термінове, особливе тощо).

$$\sum_{i=1}^n x_{a\partial ts} = \sum_{i=1}^n \eta_s^d, \forall a \in A, , \quad (2.4)$$

де η_s^d – кількість сценаріїв обробки транспортних засобів в доці, од.

Початок обслуговування автомобіля починається не раніше прибуття, тому що не можна почати обслуговування автомобіля до його прибуття до доку

$$T_{ноба} \geq T_{na}, \forall a \in A, , \quad (2.5)$$

де $T_{ноба}$ – час прибуття автомобіля до крос-докінгу, год.;

T_{na} – початок обслуговування автомобіля, год.

Обслуговування автомобіля не може початися до того, як призначений для нього док стане доступним

$$T_{na} \geq \sum_{i=1}^n y_{\partial ts} + y_{кв\partial}, \forall a \in A, \quad (2.6)$$

Час закінчення обслуговування автомобіля a за сценарієм s розраховується як сума початку і тривалості обслуговування в призначеному доку

$$T_{за} \geq T_{na} + \sum_{i=1}^n x_{a\partial ts} \cdot t_{обта_i}, \forall a \in A, \quad (2.7)$$

де $T_{за}$ – час закінчення обслуговування автомобіля a в доку ∂ , год.

Якщо два автомобіля призначено до одного дока, їх потрібно

обслуговувати послідовно – один за одним, без накладення. Для будь яких двох різних автомобілів $a_1 \neq a_2 \in A$, якщо $x_{a_1\delta} = x_{a_2\delta} = 1$.

$$T_{na_1} \geq T_{za_2} - C \cdot (1 - x_{a_1a_2}), \quad (2.8)$$

де T_{na_1} – час початку обслуговування автомобіля a_1 , год.;

T_{za_2} – час закінчення обслуговування автомобіля a_2 , год.;

$x_{a_1a_2}$ – бінарна змінна, що визначає чи обслуговується автомобіль a_1 перед a_2 , $\in (0,1)$.

У кожен момент часу загальне споживання ресурсів (робітників, навантажувально-розвантажувальної техніки і транспорту) не повинно перевищувати доступну кількість

$$y_{at}^s \cdot n_p^s \leq R_p, \quad (2.9)$$

де y_{at}^s – бінарна змінна, що дорівнює 1, якщо вантажівка a зайнята в момент t за сценарієм s , або 0 у протилежному випадку;

n_p^s – кількість працівників, необхідна для обробки вантажівки a за сценарієм s , од.;

R_p – загальна кількість працівників, од.

$$y_{at}^s \cdot n_o^s \leq R_o, \quad (2.10)$$

де n_o^s – кількість обладнання, необхідна для обробки вантажівки a за сценарієм s , од.;

R_o – максимальна кількість доступного обладнання, од.

$$y_{at}^s \cdot n_a^s \leq R_a, \quad (2.11)$$

де n_a^s – необхідна кількість транспортних засобів у сценаріях s , од.;

R_a – максимальна кількість транспортних засобів, од.

Час очікування автомобіля a розраховується як різниця між часом початку обслуговування і часом прибуття автомобіля

$$T_{oa} = T_{na} - T_{ноба}, \forall a \in A, \quad (2.12)$$

де T_{oa} – час очікування прибуття автомобіля до крос-докінгу, год.

Якщо обслуговування автомобіля закінчилося раніше запланованого виїзду, виникає достроковий виїзд який може спричинити штраф (при умові якщо не можна покинути склад раніше)

$$T_{pв_i} = \max(0, T_{звв} - T_{за}), \forall a \in A, \quad (2.13)$$

де $T_{звв}$ – запланований час виїзду автомобіля з крос-докінгу, год.

Якщо автомобіль завершує обслуговування пізніше свого розкладу - фіксується затримка і застосовується штраф

$$T_{пв_i} = \max(0, T_{за} - T_{звв}), \forall a \in A. \quad (2.14)$$

Розроблено математичну модель, призначену для оптимізації логістичних операцій на складі в умовах обмеженості ресурсів і часової невизначеності. Отримані математичні залежності дають змогу ефективно визначати необхідну кількість і розподіл транспортних засобів, а також інших ресурсів, які необхідні для виконання операцій із крос-докінгу. Модель враховує різноманітні сценарії виконання операцій, що дає змогу в умовах невизначеності та обмежень мінімізувати загальні витрати.

2.3 Інформаційно-технологічні засади координації учасників процесу крос-докінгу

Ефективна реалізація крос-докінгу при доставці вантажів автомобільним транспортом у міжнародному сполученні можлива лише за умови скоординованої взаємодії всіх учасників логістичного процесу. Високий рівень комунікації, детальне планування та інтеграція сучасних технологічних рішень сприяють оптимізації витрат, мінімізації часу обробки вантажів і підвищенню рівня сервісного обслуговування. Все це є визначальним фактором забезпечення конкурентоспроможності підприємств у динамічних умовах сучасного логістичного ринку.

Крос-докінг, як логістична стратегія, яка передбачає швидке переміщення товарів через склад без довготривалого зберігання потребує щоб усі учасники процесу – від постачальників до кінцевих отримувачів – працювали злагоджено (рис. 2.6). Для ефективного реалізації крос-докінгу необхідна узгоджена робота всіх учасників логістичного процесу, а саме:

- логістичні оператори та експедитори – планують маршрути та узгоджують графіки перевезень; організовують взаємодію між перевізниками, митними органами та клієнтами; відповідають за оформлення транспортних документів (накладні, сертифікати, ліцензії); контролюють доставку вантажів, оптимізують логістичні ланцюги;

- транспортні компанії – координують рух транспортних засобів відповідно до митних і технічних вимог; взаємодіють із терміналами, портами, аеропортами та залізничними станціями; контролюють безпеку та дотримання графіків перевезень;

- митні брокери та митні орган – забезпечують правильне та швидке оформлення митних декларацій; перевіряють відповідність вантажів митним і міжнародним стандартам; координують взаємодію між відправниками, отримувачами та митницею;

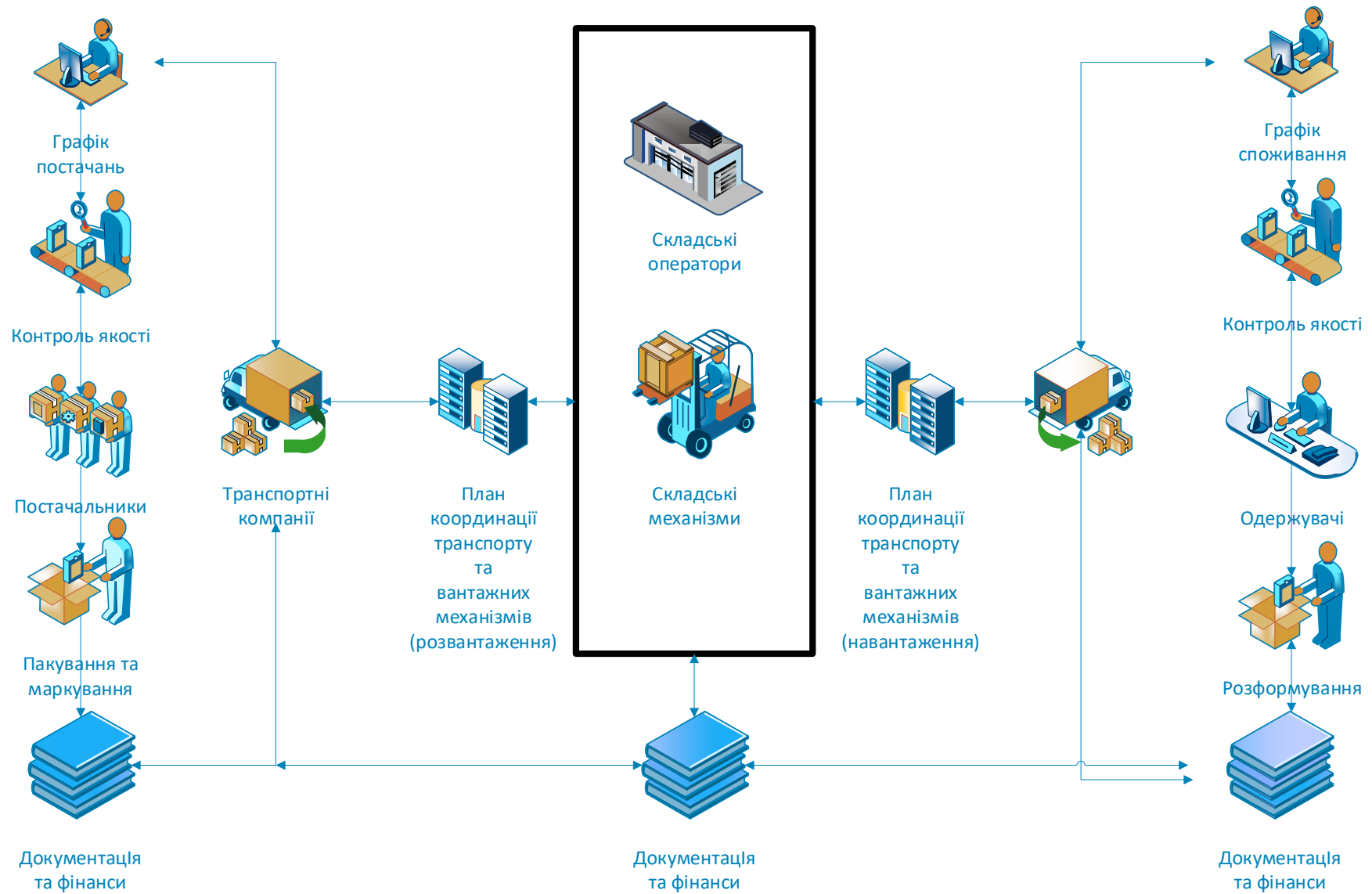


Рисунок 2.6 – Загальна схема координації роботи учасників транспортного процесу

- вантажоодержувачі та постачальники – узгоджують терміни відправлення та отримання товарів; контролюють відповідність вантажу договірним умовам; організовують складську логістику після доставки;
- координатори логістичних ланцюгів та управлінські компанії – відповідають за стратегічне планування міжнародних перевезень; впроваджують цифрові системи моніторингу та управління (TMS, WMS); аналізують ефективність логістичних процесів і пропонують їх оптимізацію;
- страхові компанії та контролюючі органи – гарантують фінансовий захист вантажу від ризиків; контролюють дотримання екологічних, санітарних та технічних норм.

Крос-докінг на складі передбачає швидке переміщення товарів від постачальника до кінцевого отримувача без тривалого зберігання. Ефективність цього процесу значною мірою залежить від узгодженої роботи всіх учасників. Ефективне функціонування сучасних міжнародних ланцюгів поставок неможливе без застосування передових логістичних технологій, серед яких крос-докінг посідає одне з провідних місць завдяки своїй здатності значно скорочувати час доставки та мінімізувати витрати на зберігання вантажів. Однак практична реалізація крос-докінгових операцій, особливо при роботі з дрібними партіями вантажів, що консолідуються на логістичних центрах (ЛЦ) для подальшого відправлення великотоннажним транспортом, стикається з низкою суттєвих викликів.

Аналіз специфіки технології крос-докінгу, яка передбачає пряме перевантаження товарів з мінімальним часом зберігання на складі, показує її високий потенціал для оптимізації логістичних процесів. Водночас, її ефективна реалізація, особливо в складних умовах міжнародних перевезень, де взаємодіють численні учасники та використовуються різні види транспорту, пов'язана з низкою характерних проблемних аспектів. Для розуміння цих аспектів, їхнього впливу на ключові показники логістичної системи та визначення ролі інформаційних технологій у їх подоланні, основні проблемні аспекти систематизовані та представлені в таблиці 2.1.

Таблиця 2.1 – Проблемні аспекти крос-докінгу та ІТ-орієнтовані напрямки їх вирішення

Проблемний аспект крос-докінгу	Характеристика та потенційні негативні наслідки	Аспекти діяльності, що піддаються негативному впливу	Потенційні напрямки вирішення за допомогою розроблюваної ІТ
1	2	3	4
Необхідність жорсткої синхронізації вхідних та вихідних матеріальних потоків	Характеризується потребою у чіткому часовому узгодженні прибуття ТЗ, що доставляють дрібні партії, та графіків підготовки/відправлення магістральних ТЗ Наслідки: простої ТЗ, зрив графіків відправлення, зниження пропускної здатності ЛЦ, ризик накопичення вантажу	Час виконання операцій, ефективність використання транспорту, завантаженість ресурсів ЛЦ (НРП, зони тимчасової консолідації), вартість логістики	Розробка модуля динамічного планування та оптимізації спільних операційних графіків; система автоматичних сповіщень про статус прибуття/відправлення ТЗ
Обмежений часовий ресурс на виконання операцій	Визначається високими вимогами до швидкості виконання всіх технологічних операцій (розвантаження, ідентифікація, сортування, комплектація, завантаження) в умовах мінімального буферного часу Наслідки: необхідність високої продуктивності НРП та персоналу, ризик затримок при пікових навантаженнях	Продуктивність праці, пропускна здатність НРП, якість обслуговування (швидкість), операційні витрати (персонал, обладнання)	Модуль оптимального розподілу завдань між НРП; інструменти моніторингу продуктивності в реальному часі; підтримка прийняття рішень для диспетчера щодо пріоритезації операцій
Висока точність операцій сортування та комплектації	Полягає у необхідності безпомилкової ідентифікації, сортування та переміщення численних дрібних партій від різних відправників для різних одержувачів Наслідки: висока вартість помилки (неправильне відправлення, втрати), потреба у надійних системах контролю	Якість логістичного сервісу, репутація ЛЦ, фінансові втрати (компенсації, повернення), ефективність використання складського простору (зони сортування)	Інтеграція з системами автоматичної ідентифікації (штрих-кодування, RFID); модуль контролю відповідності вантажу та документації; ведення електронного обліку всіх операцій

Продовження таблиці 2.1

1	2	3	4
Вплив непередбачуваних факторів (стохастичність зовнішнього середовища)	Проявляється у високій чутливості процесу до зовнішніх збурень (затримки на митниці, зміни в дорожній обстановці, технічні несправності ТЗ/обладнання ЛЦ, коливання попиту) Наслідки: порушення графіків, необхідність оперативного перепланування, ризик збоїв	Надійність ланцюга поставок, стабільність операційної діяльності, адаптивність системи управління	Розробка алгоритмів динамічного перепланування графіків; модуль сценарного моделювання ("що-як"); система оперативного інформування всіх зацікавлених сторін про зміни та відхилення
Інформаційна непрозорість та недостатня координація між учасниками	Характеризується відсутністю або фрагментарністю єдиного інформаційного простору та ефективних каналів комунікації між усіма залученими сторонами Наслідки: ускладнення обміну даними, труднощі в прийнятті узгоджених рішень, затримки через брак інформації	Ефективність комунікації, швидкість прийняття рішень, прозорість ланцюга поставок, рівень довіри між партнерами, можливість простежуваності вантажів	Створення єдиної інформаційної платформи (порталу) для всіх учасників крос-докінгової операції; забезпечення стандартизованого обміну даними; інструменти спільної роботи та документообігу
Забезпечення безпеки та збереження вантажів при перевантаженнях	Полягає у підвищеному ризику пошкодження або втрати вантажів через багаторазові маніпуляції та обмежений час на ретельну перевірку Наслідки: матеріальні збитки, страхові випадки, погіршення репутації	Збереження вантажів, фінансові ризики, задоволеність клієнтів, відповідальність перевізника та ЛЦ	Модуль фіксації стану вантажу на етапах приймання/перевантаження/відправлення (можливо, з фото/відеофіксацією); інтеграція з системами безпеки ЛЦ; покращена простежуваність
Необхідність високої кваліфікації та гнучкості персоналу ЛЦ	Визначається потребою в працівниках, здатних швидко та точно виконувати різноманітні операції в умовах високої інтенсивності та обмеженого часу, адаптуватися до змін у графіках Наслідки: дефіцит кваліфікованих кадрів, помилки через людський фактор, плинність персоналу	Людські ресурси (навчання, мотивація, утримання), якість виконання операцій, продуктивність праці, адаптивність до змін	Інтуїтивно зрозумілий інтерфейс ІТ для персоналу; надання чітких інструкцій та завдань через систему; модуль аналізу продуктивності для виявлення потреби в навчанні

Особливої актуальності ці аспекти набувають для України, яка активно інтегрується в європейські та світові транспортні коридори. Підвищення ефективності роботи вітчизняних логістичних центрів, зокрема тих, що спеціалізуються на обробці міжнародних вантажів, є важливим фактором конкурентоспроможності національної економіки, особливо в контексті повоєнного відновлення та розбудови нових ланцюгів поставок. У цьому контексті, логістичні центри, розташовані в ключових транспортних вузлах, таких як Харків, відіграють стратегічну роль.

Управління складними та динамічними процесами крос-докінгу, особливо в контексті міжнародних перевезень дрібних партій вантажів, вимагає високоточних інструментів координації. Як було зазначено синхронізація матеріальних потоків та ефективне використання ресурсів є ключовими факторами успіху. Саме узгоджені операційні дії виступають тим центральним механізмом, що дозволяє гармонізувати роботу всіх елементів крос-докінгової системи – від прибуття ТЗ з вхідними вантажами до своєчасного відправлення консолідованих партій магістральним транспортом. Численні дослідження в галузі логістики та управління ланцюгами поставок підтверджують, що впровадження та суворе дотримання раціонально побудованих операційних графіків безпосередньо впливає на ключові показники ефективності крос-докінгу.

Однією з найбільш значущих проблем при незлагодженій організації крос-докінгу є простої транспортних засобів. Автомобілі, що доставляють дрібні партії вантажів, можуть тривалий час очікувати на звільнення НРП, а магістральні автомобілі – на комплектацію всіх необхідних партій або на звільнення НРП для завантаження. Це наочно ілюструє схема, представлена на рисунку 2.7.

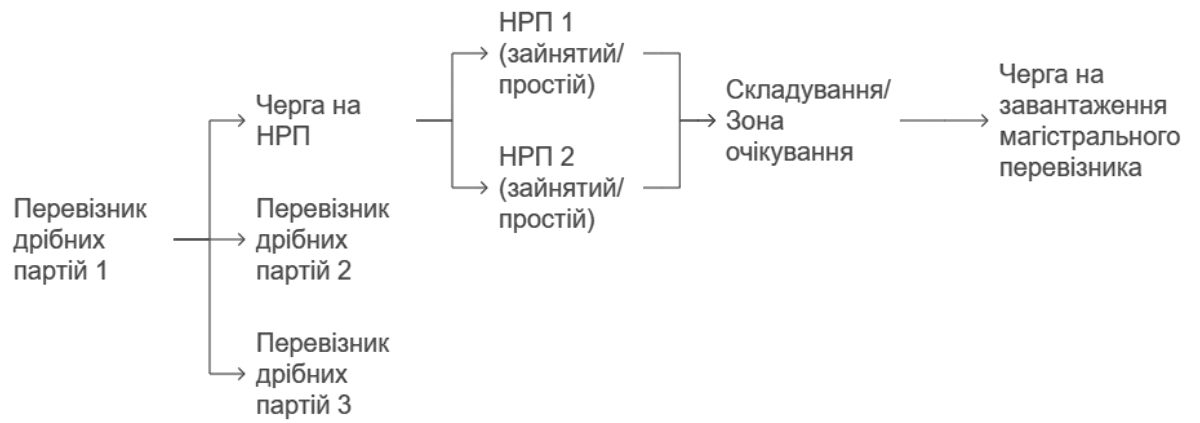


Рисунок 2.7 - Схема незлагодженої роботи ЛЦ при крос-докінгу

На противагу цьому, розробка узгоджених операційних графіків (рис. 2.8) передбачає призначення кожному ТЗ конкретного часового вікна («тайм-слоту») для прибуття, розвантаження або завантаження. Це дозволяє синхронізувати прибуття перевізників дрібних партій вантажу з наявністю вільних НРП та графіком підготовки магістральних автомобілів.

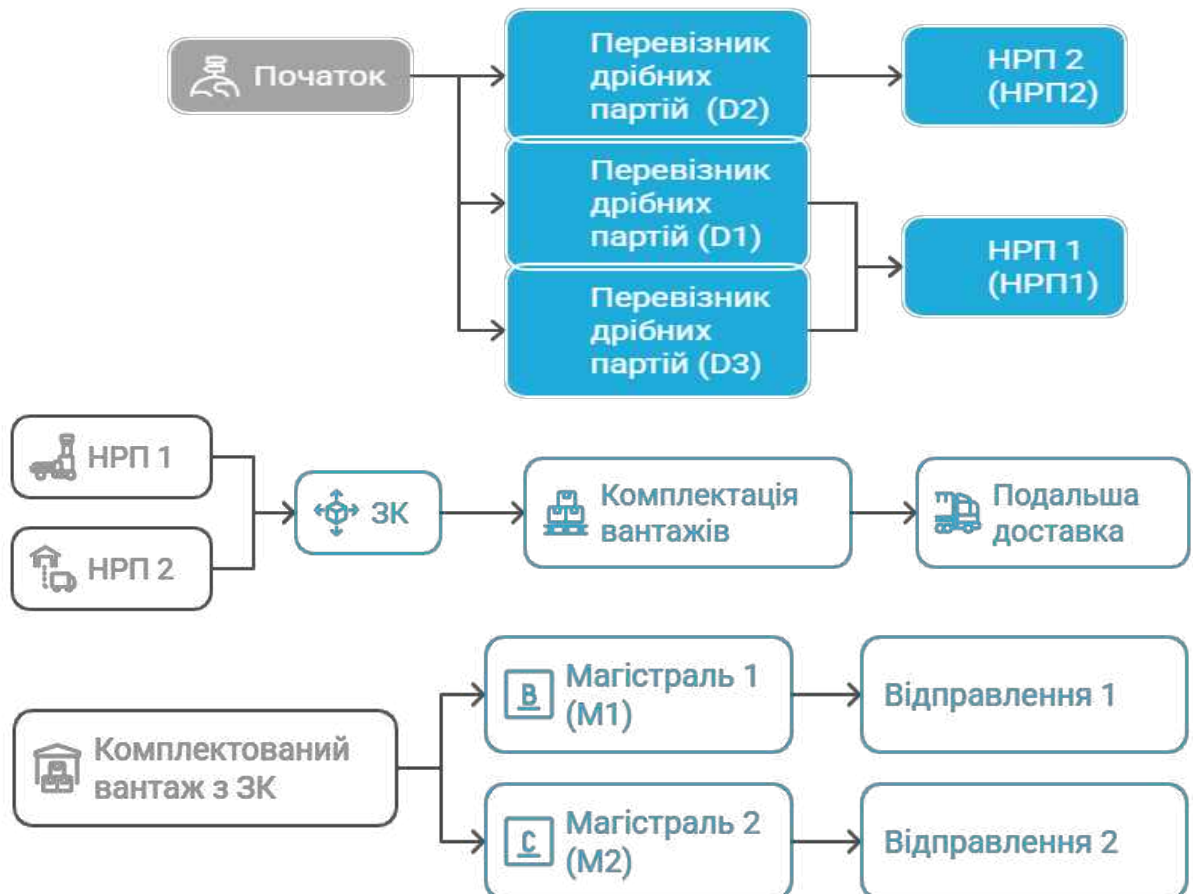


Рисунок 2.8 – Схема роботи по узгодженим операційним графікам

Ефект від мінімізації простоїв може бути кількісно оцінений через коефіцієнт простою транспорту

$$K_{np} = \frac{\sum_{i=1}^n T_{np_i}}{T_{zag}} \quad (2.15)$$

де T_{np_i} – час простою і-го транспортного засобу, год.;

n – кількість транспортних засобів, од.;

T_{zag} – загальний плановий фонд робочого часу транспортних засобів на ЛЦ, год.

Нерівномірне прибуття вантажів призводить до періодів пікового навантаження на НРП та персонал, що чергуються з періодами їх простою. Розробка операційних графіків дозволяє більш рівномірно розподілити навантаження на наявні ресурси ЛЦ (НРП, вантажників, операторів сортувальних ліній) протягом робочої зміни. Це забезпечує ритмічність виконання операцій та підвищує коефіцієнт використання обладнання та персоналу, що наочно можна продемонструвати на графіку завантаження НРП (рис. 2.9) [138].

Загальний час обробки вантажу на ЛЦ в умовах крос-докінгу складається з послідовно-паралельних операцій

$$T_{обр_{лц}} = \max(T_{приб_{Д_i}}) + T_{розв_{Д_i}} + T_{сорт/компл_{Д_i}} + T_{оч_{М_i}} + T_{нав_{М_i}} - T_{поч_{роб}} \quad (2.16)$$

де $T_{приб_{Д_i}}$ – час прибуття і-го перевізника дрібних партій вантажу (якщо партії консоліднуються), год.хв.;

$T_{розв_{Д_i}}$ – час розвантаження і-го перевізника дрібних партій вантажу (якщо партії консоліднуються), год.хв.;

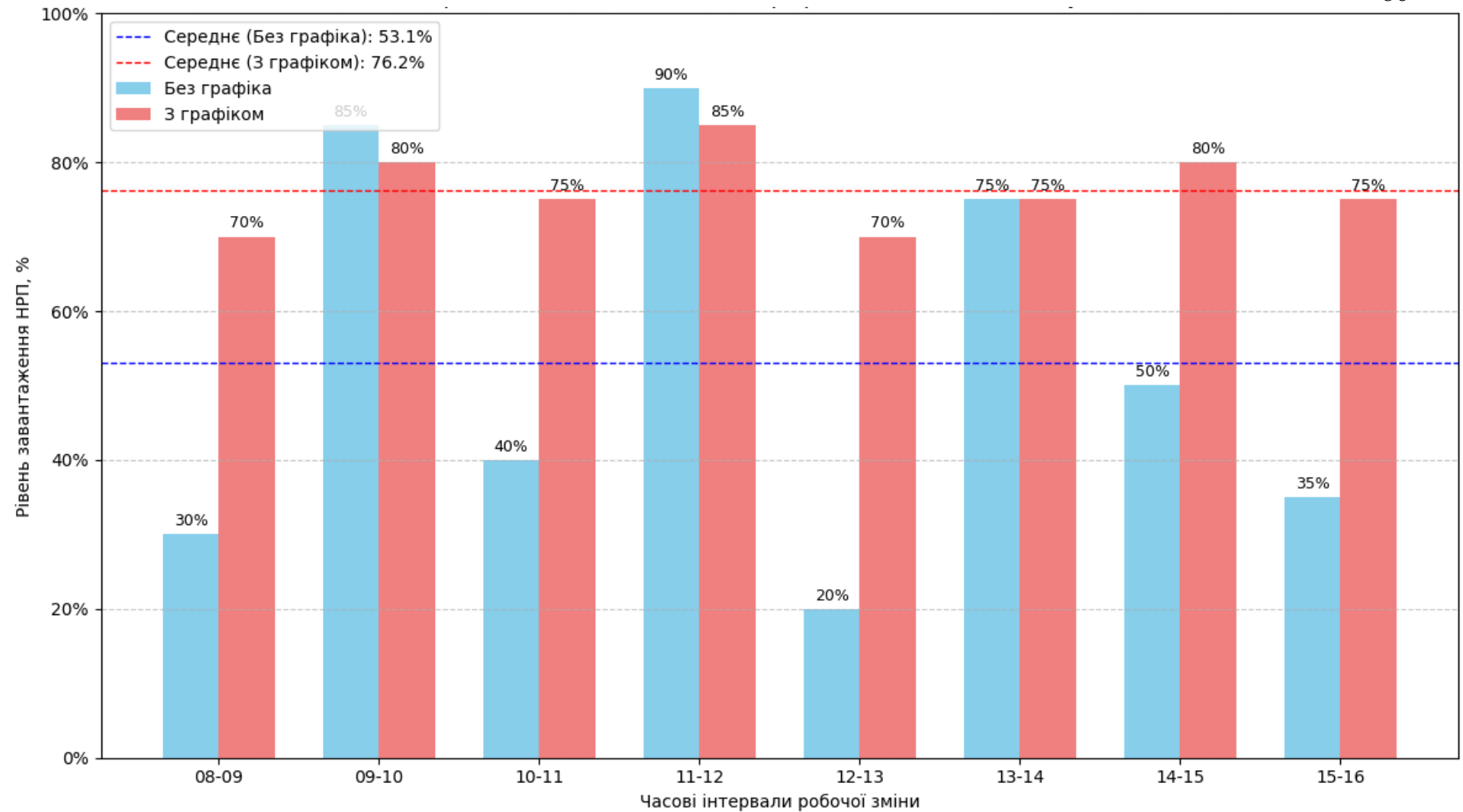


Рисунок 2.9 – Порівняння завантаження НРП при різних підходах до планування

$T_{\text{сорт/компл_Д}_i}$ – час на сортування/комплектацію (мінімальний при прямому крос-докінгу), год.хв.;

$T_{\text{оч_М}_i}$ – час очікування магістральним автомобілем готовності вантажу або НРП, год.хв.;

$T_{\text{нав_М}_i}$ – час навантаження магістрального автомобіля, год.хв.;

$T_{\text{поч_роб}}$ – час початку першої операції, год.хв.

Розробка узгоджених графіків спрямована насамперед на мінімізацію $T_{\text{оч_М}_i}$ та оптимізацію паралельності виконання операцій розвантаження кількох перевізників дрібних партій вантажу та завантаження магістральних транспортних засобів, що призводить до скорочення загального $T_{\text{обр_лц}}$. Наочним прикладом може слугувати фрагмент діаграми Ганта (рис. 2.10), що візуалізує скоординовану роботу у часі [139].

Пропускна здатність ЛЦ $Q_{\text{лц}}$, тобто максимальний обсяг вантажу, який може бути оброблений за одиницю часу (наприклад добу), безпосередньо залежить від ефективності використання НРП та середнього часу обробки одиниці вантажу. Її можливо виразити узагальненою формулою

$$Q_{\text{лц}} = \frac{N_{\text{НРП}} \cdot T_{\text{зм}} \cdot K_{\text{вик_НРП}}}{\bar{t}_{\text{обр}}} \rightarrow \max, \quad (2.17)$$

де $N_{\text{НРП}}$ – кількість НРП, од.;

$T_{\text{зм}}$ – тривалість робочої зміни, год;

$K_{\text{вик_НРП}}$ – коефіцієнт використання НРП;

$\bar{t}_{\text{обр}}$ – середній час обробки одиниці вантажопотоку (або однієї крос-докінгової операції), год.

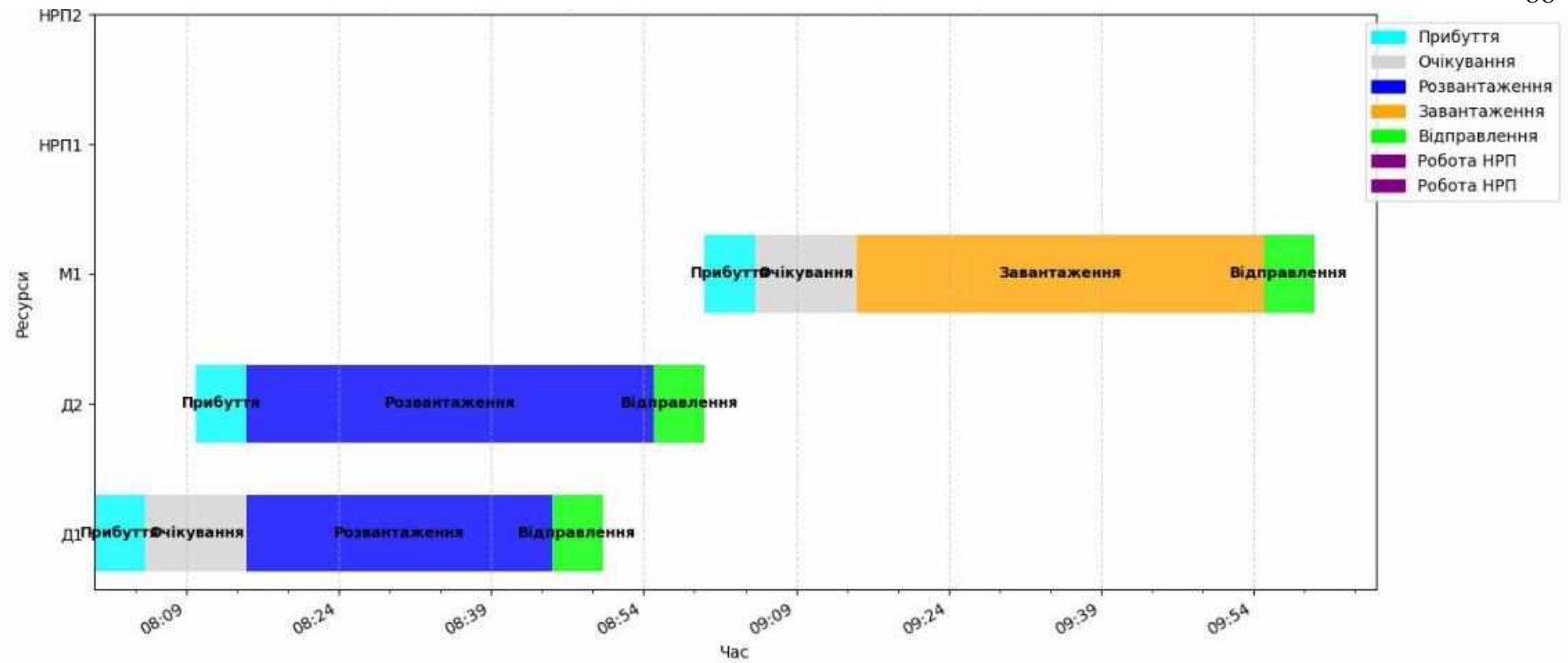


Рисунок 2.10 – Фрагмент операційного графіка спільної роботи

Розробка операційних графіків спільної роботи, підвищуючи $K_{вик_НРП}$ та знижуючи $\bar{t}_{обр}$ (за рахунок усунення простоїв та оптимізації послідовності операцій), сприяє зростанню пропускної здатності ЛЦ.

Скорочення простоїв автомобільного транспорту веде до прямої економії палива та зменшення витрат на амортизацію. Оптимізація використання НРП та персоналу знижує питомі витрати на заробітну плату та утримання обладнання на одиницю обробленого вантажу. Мінімізація часу обробки зменшує ризики псування вантажів (особливо актуально для товарів з обмеженим терміном придатності) та пов'язані з цим збитки. Уникнення зривів графіків відправлення дозволяє уникнути штрафних санкцій від партнерів та клієнтів. Сукупний ефект від цих факторів призводить до значного зниження загальних операційних витрат на ЛЦ.

2.4 Методичний підхід до вибору раціональної транспортно-технологічної схеми доставки вантажів

Загальні цілі міжнародних автомобільних вантажних перевезень є багатограними, відображаючи різноманітні потреби та пріоритети зацікавлених сторін, залучених до світової торгівлі. Насамперед, метою є ефективне переміщення товарів через кордони, забезпечення плавного та безперебійного потоку в складній мережі міжнародних ланцюгів постачання. Цей безперешкодний транзит є вирішальним для своєчасної доставки продукції споживачам та підприємствам, підтримуючи функціональність світової економіки.

Для підприємств, що займаються міжнародною торгівлею, економічна ефективність є постійно значущою метою. Транспортні витрати можуть становити значну частину загальних витрат, пов'язаних із міжнародною торгівлею. Тому мінімізація цих витрат безпосередньо впливає на прибутковість підприємств та їхню здатність ефективно конкурувати на

світовому ринку. Досягнення економічної ефективності часто передбачає оптимізацію маршрутів, консолідацію відправлень та вибір найбільш економічних видів транспорту та перевізників.

Своєчасна та надійна доставка є ще однією критично важливою метою, зумовленою зростаючими очікуваннями клієнтів та необхідністю мінімізувати витрати на зберігання запасів. У сучасному швидкоплинному бізнес-середовищі, де поширені системи управління запасами «точно в строк» (just-in-time) і задоволеність клієнтів є першочерговою, здатність доставляти товари швидко та надійно забезпечує значну конкурентну перевагу. Затримки в доставці можуть призвести до збільшення операційних витрат, втрати продажів та шкоди репутації компанії.

Забезпечення безпеки та збереження вантажів, що перевозяться, та загального процесу транспортування також має першочергове значення.¹⁴ Міжнародні вантажні перевезення невід'ємно пов'язані з такими ризиками, як аварії, крадіжки та пошкодження вантажу. Впровадження надійних протоколів безпеки та заходів захисту є важливим для збереження вартості товарів, що перевозяться, та підтримки цілісності ланцюга постачання.

Для оцінки успішності зусиль з організації та оптимізації міжнародних автомобільних вантажних перевезень використовується низка критеріїв для оцінки ефективності. Ці критерії забезпечують кількісні показники ефективності за різними критично важливими аспектами транспортного процесу (табл. 2.2).

Таблиця 2.2 – Ключові показники ефективності для міжнародних автомобільних вантажних перевезень

Категорія КРІ	Конкретний КРІ	Релевантність
Економічна ефективність	Вартість перевезення на одиницю вантажу	Вимірює прямі витрати на перевезення кожної одиниці товару
	Витрати на вихідні/вхідні перевезення	Вказує на частку доходу/витрат, що припадає на транспортування

Продовження таблиці 2.2

Категорія КРІ	Конкретний КРІ	Релевантність
Економічна ефективність	Транспортні витрати як % від загальної вартості продукту	Підкреслює загальну економічну значущість транспортування
Час доставки	Показник своєчасної доставки	Відображає надійність дотримання узгоджених графіків доставки
	Час транзиту	Вимірює загальний час, необхідний для доставки відправлення до місця призначення
	Час виконання замовлення	Охоплює весь час виконання замовлення
Якість обслуговування	Показник точності замовлення	Вказує на точність виконання замовлення
	Рівень пошкоджень та втрат	Вимірює цілісність товарів під час транспортування
	Рівень задоволеності клієнтів	Відображає загальну задоволеність клієнтів транспортною послугою
Використання ресурсів	Коефіцієнт використання місткості ТЗ	Оцінює, наскільки ефективно використовується вантажопідйомність транспортних засобів
	Паливна ефективність	Вимірює відстань, пройдену на одиницю палива, впливаючи на витрати та викиди
Вплив на навколишнє середовище	Викиди CO ² на відправлення/км	Кількісно визначає викиди парникових газів, пов'язані з транспортуванням
	Споживання палива	Вказує на загальну кількість палива, використаного для транспортування

У математичних моделях, що використовуються для оптимізації міжнародних автомобільних вантажних перевезень, зазвичай застосовуються кілька цільових функцій для представлення конкретних цілей процесу оптимізації. Ці цільові функції спрямовують модель у пошуку найкращого можливого рішення.

Мінімізація витрат є найчастіше використовуваною цільовою функцією. Вона може охоплювати різні складові витрат, включаючи витрати на паливо, операційні витрати (такі як технічне обслуговування, плата за проїзд та оплата праці), плату за складування та адміністративні накладні витрати. Математична формулювання цієї цільової функції зазвичай передбачає підсумовування всіх відповідних витрат, пов'язаних із певним планом перевезень, та прагнення знайти план, який дає найнижчу загальну вартість.

Мінімізація часу доставки є ще однією критично важливою цільовою функцією, особливо в сценаріях, де швидкість та оперативність мають першочергове значення. Ця цільова функція спрямована на пошук транспортних планів, які мінімізують загальний час, необхідний для доставки товарів від місця їх походження до кінцевого пункту призначення. Формулювання може включати мінімізацію максимального часу, витраченого на будь-який окремий маршрут, або мінімізацію суми часу в дорозі для всіх доставок. Математичні моделі можуть враховувати такі фактори, як швидкість руху, час завантаження та розвантаження, а також потенційні затримки, щоб точно представити загальний час доставки.

Мінімізація відстані/пробігу часто використовується як проксі для мінімізації як витрат (особливо на паливо), так і часу доставки. Метою тут є пошук маршрутів, що покривають найкоротші можливі відстані між пунктами відправлення та призначення. Це може призвести до зниження споживання палива, зменшення зносу транспортних засобів та потенційно швидшого часу доставки. Програмне забезпечення для оптимізації маршрутів часто використовує цю цільову функцію для визначення найефективніших шляхів для транспортних засобів доставки, враховуючи такі фактори, як дорожні мережі, умови руху та місця доставки.

Різні підходи до оптимізації логістичних систем пропонують різні переваги та недоліки, які застосовуються при організації міжнародних

автомобільних вантажних перевезень (табл. 2.3). Вибір цільової функції часто передбачає компроміси між конкуруючими цілями.

Таблиця 2.3 – Переваги та недоліки підходів до оптимізації логістичних систем

Цільова функція	Переваги	Недоліки
Мінімізація витрат	Прямий позитивний вплив на прибутковість компанії	Може призвести до компромісів щодо часу доставки або якості обслуговування (наприклад, вибір найдешевшого, але повільнішого перевізника)
	Дозволяє пропонувати більш конкурентоспроможні ціни на товари та послуги	Ризик вибору менш надійних перевізників, що збільшує ймовірність пошкодження або втрати вантажу
	Основний фокус для багатьох логістичних провайдерів та бізнесів	Надмірна економія без урахування екологічних аспектів може призвести до використання менш паливно-ефективних транспортних засобів, збільшуючи викиди
Мінімізація часу доставки	Підвищує задоволеність клієнтів та може бути ключовою конкурентною перевагою	Часто пов'язана з вищими транспортними витратами (наприклад, експрес-доставка)
	Зменшує витрати на утримання запасів як для відправника, так і для одержувача	Може вимагати менш ефективної маршрутизації з точки зору пробігу, якщо пріоритет надається прямим маршрутам, а не консолідованим
	Критично важлива для товарів, що швидко псуються, або термінових відправлень	Зосередженість лише на швидкості може призвести до втрати можливостей для економії коштів або зменшення впливу на довкілля

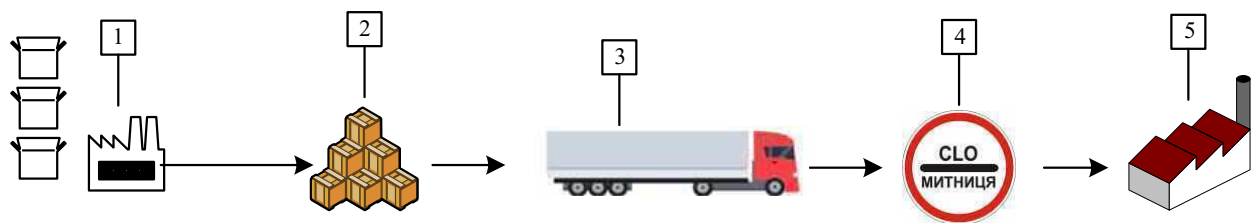
Продовження таблиці 2.3

Мінімізація відстані перевезення	Потенційно знижує витрати (менше пального, менший знос транспорту) та час доставки	Найкоротший маршрут не завжди є найшвидшим або найдешевшим (наприклад, через затори, погану якість доріг)
	Коротші маршрути зазвичай означають швидший транзит	Зосередження виключно на відстані може не оптимізувати ефективність завантаження транспортного засобу
	Безпосередньо сприяє зменшенню викидів парникових газів	Може не враховувати інші важливі логістичні обмеження (наприклад, часові вікна доставки, необхідність відвідування певних пунктів)
Мінімізація впливу на довкілля	Відповідає зростаючим екологічним вимогам та регулюванням	Може вимагати значних початкових інвестицій (наприклад, в електричні вантажівки, альтернативне паливо)
	Покращує репутацію компанії та приваблює екологічно свідомих клієнтів	Використання екологічно чистіших, але дорожчих видів палива або технологій може збільшити операційні витрати
	Може призвести до довгострокової економії коштів через підвищення паливної ефективності або використання альтернативних джерел енергії	У короткостроковій перспективі може призвести до збільшення часу доставки або ускладнення операційних процесів (наприклад, обмежений запас ходу електровантажівок, необхідність планування зарядки)

Управління ланцюгами поставок у сфері міжнародних автомобільних перевезень вантажів потребує прийняття обґрунтованих рішень щодо організації логістичних процесів. Одним із ключових завдань є вибір найбільш ефективної схеми доставки вантажу від вантажовідправника до вантажоодержувача, яка б відповідала вимогам щодо мінімальної вартості перевезення та термінів перевезення. У даному дослідженні розглядаються чотири логістичні схеми, вибір між якими визначатиме загальну ефективність перевізного процесу.

Для досягнення мети дослідження пропонується розглянути наступні варіанти організації міжнародного автомобільного перевезення вантажів:

– схема 1 – пряме перевезення, ця схема передбачає доставку вантажу безпосередньо від вантажовідправника (при необхідності вантаж накопичується у відправника) до вантажоодержувача одним транспортним засобом без залучення проміжних логістичних центрів для консолідації, деконсолідації чи перевантаження, це класичний варіант «від дверей до дверей» (рис. 2.11);



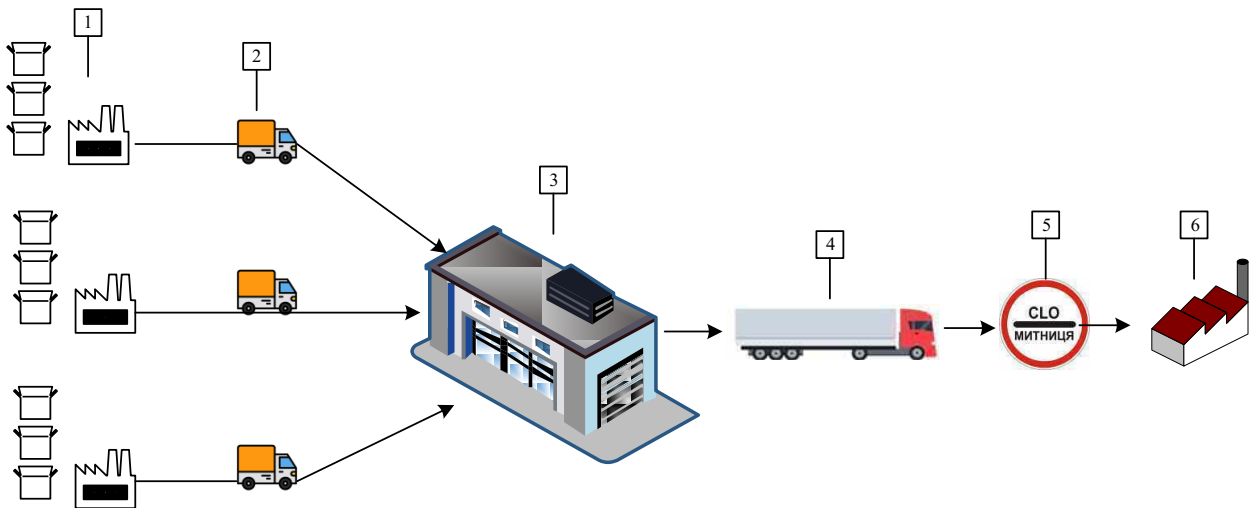
1 – вантажовідправник, 2 – накопичення вантажу у відправника, 3 – магістральні перевезення, 4 – митниця, 5 – вантажоодержувач

Рисунок 2.11 – Схема доставки вантажу за прямим варіантом

– схема 2 – використання логістичного центру на території країни відправлення, вантаж від вантажовідправника спершу доставляється до логістичного центру, розташованого в країні відправлення, у логістичному центрі застосовується технологія крос-докінгу, вантаж консолідується з іншими вантажами, відбувається перевантаження на магістральний транспортний засіб для подальшого міжнародного перевезення до кінцевого вантажоодержувача (рис. 2.12). Ця схема доцільна при необхідності об'єднання дрібних партій вантажів або оптимізації завантаження транспортних засобів на міжнародному етапі;

– схема 3 – використання логістичного центру на території країни призначення, вантаж перевозиться магістральним транспортом від вантажовідправника до логістичного центру розташованого в країні призначення, поблизу вантажоодержувача, у логістичному центрі за

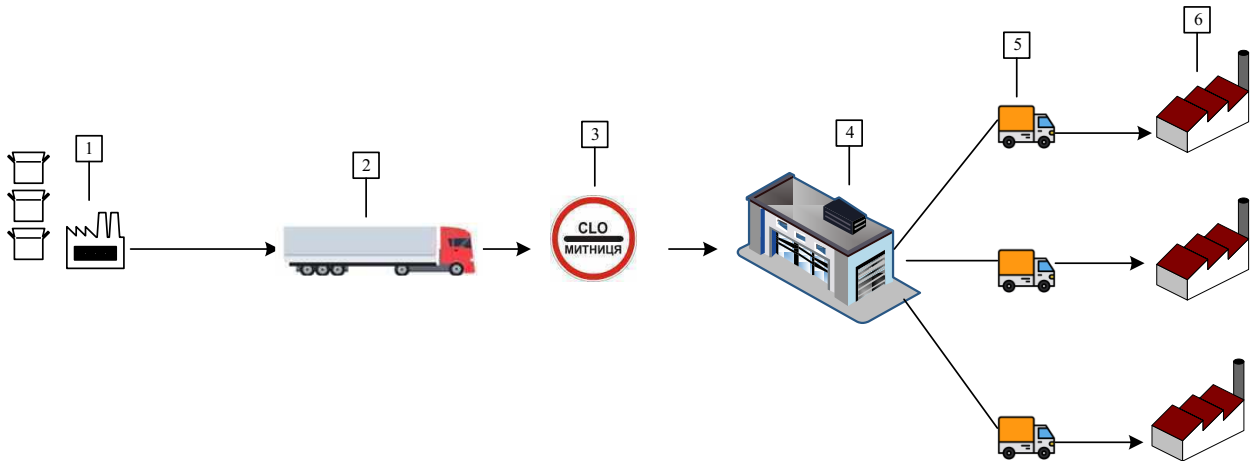
допомогою технології крос-докінгу здійснюється деконсолідація вантажу та/або його перевантаження на транспортні засоби меншої вантажопідйомності для здійснення доставки «останньої милі» до кінцевого вантажоодержувача (рис. 2.13). Ця схема ефективна при доставці великих партій вантажів кільком отримувачам у межах одного регіону або при необхідності швидкої локальної дистрибуції;



1 – вантажовідправники, 2 – транспортна компанія здійснює дрібнопартійні перевезення, 3 – логістичний центр, 4 – міжнародна транспортна компанія, здійснює збірні перевезення, 5 – митниця, 6 – вантажоодержувач

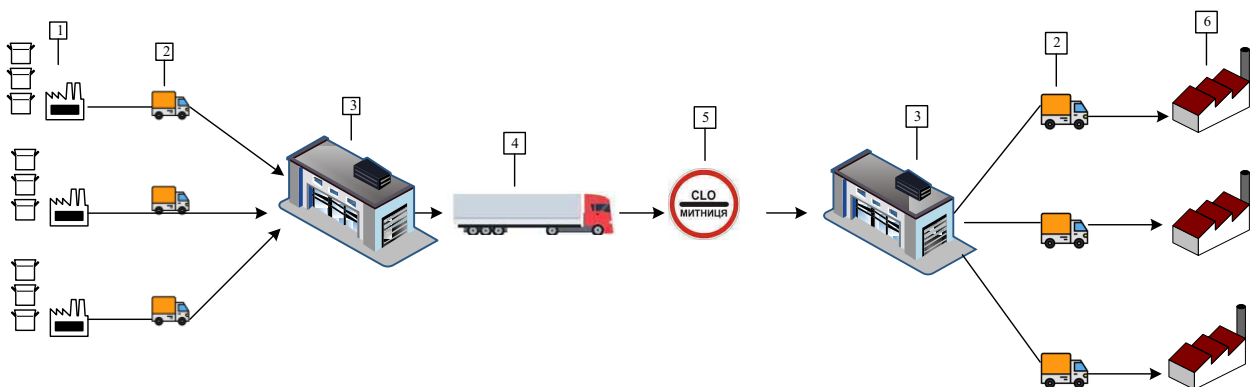
Рисунок 2.12 – Схема доставки вантажу з використанням логістичного центру на території вантажовідправника

– схема 4 – використання логістичних центрів на території країн відправлення та призначення, ця схема є комбінацією двох попередніх, вантаж від вантажовідправника доставляється до логістичного центру в країні відправлення (консолідація/крос-докінг), потім магістральним транспортом перевозиться до логістичного центру в країні призначення (деконсолідація/крос-докінг), і вже звідти доставляється кінцевому вантажоодержувачу (рис. 2.14). Ця схема може бути виправдана у складних логістичних ланцюгах, де потрібна оптимізація на обох етапах – відправлення та прибуття.



1 – вантажовідправник, 2 – міжнародна транспортна компанія, здійснює перевезення, 3 – митниця, 4 – логістичний центр, 5 – транспортна компанія здійснює дрібнопартійні перевезення, 6 – вантажоодержувачі

Рисунок 2.13 – Схема доставки вантажу з використанням логістичного центру на території вантажоодержувача



1 – вантажовідправники, 2 – транспортна компанія здійснює дрібнопартійні перевезення, 3 – логістичний центр, 4 – міжнародна транспортна компанія, здійснює збірні перевезення, 5 – митниця, 6 – вантажоодержувачі

Рисунок 2.14 – Схема доставки вантажу з використанням логістичного центра території вантажовідправника та вантажоодержувача

Вибір раціональної схеми доставки здійснюється на основі загальних витрат на доставку вантажів в міжнародному сполученні, та додаткового критерію загального часу доставки. Формальна постановка задачі полягає у виборі такої транспортно-технологічної схеми $s \in \{1, 2, 3, 4\}$, яка мінімізує

цільову функцію сукупних логістичних витрат. Модель не є класичною задачею лінійного програмування, а являє собою структурований методичний підхід до розрахунку та порівняння загальних витрат для чотирьох дискретних, взаємовиключних сценаріїв. Основною метою є знаходження схеми s , що мінімізує загальні витрати $V_{заг}$. Цільова функція при цьому має вигляд

$$V_{заг}^{(s)} = \underbrace{\sum_{i \in I} \sum_{j \in J_{дріб}} V_{ij}^{(s)}}_{V_{дріб}^{(s)}} + \underbrace{\sum_{i \in I} \sum_{j \in J_{маг}} V_{ij}^{(s)}}_{V_{маг}^{(s)}} + V_{мит}^{(s)} + V_{прст}^{(s)} + V_{вр}^{(s)} \rightarrow \min, \quad (2.18)$$

де I – множина учасників логістичного ланцюга: i_1 – вантажовідправники, i_2 – транспортна компанія, що здійснює дрібнопартійні перевезення, i_3 – логістичні центри, i_4 – міжнародний перевізник, i_5 – вантажоодержувачі;

$J_{дріб}$ – множина операцій, пов'язаних з дрібними партіями вантажу:

j_1 – оформлення заявки, j_2 – формування партії, j_3 – навантаження дрібних партій, j_4 – транспортування дрібних партій до та від логістичного центру, j_5 – розвантаження дрібних партій;

$J_{маг}$ – множина операцій магістральних перевезень: j_6 – формування консолідованих відправлень, j_7 – навантаження-розвантаження магістральних транспортних засобів, j_8 – транспортування магістральною ділянкою маршруту;

$V_{ij}^{(s)}$ – витрати, пов'язані з виконанням j -тої операції i -м учасником (або на його ділянці) у рамках схеми s , грн.;

$V_{дріб}^{(s)}$ – сукупні витрати на операції з дрібними партіями вантажу, грн.;

$V_{маг}^{(s)}$ – сукупні витрати на магістральні перевезення, грн.;

$V_{мит}^{(s)}$ – витрати, пов'язані з митним оформленням, грн.;

$V_{прст}^{(s)}$ – витрати, пов'язані з простоями, грн.;

$V_{ep}^{(s)}$ – витрати, пов'язані з «військовим ризиком» при перевезенні вантажу в регіонах, де ведуться бойові дії, грн.

Окремі складові $V_{ij}^{(s)}$ включають витрати на оформлення заявки на перевезення партії відправки, формування партії, завантаження, транспортування до логістичного центру, розвантаження та обробку на логістичному центрі, подальше транспортування до вантажоодержувача тощо, які в подальшому деталізуються у наступних формулах.

Загальний час доставки партії вантажу в міжнародному сполученні

$$T_d = t_n + t_p + t_{mk} + t_r + t_{kd} + t_{od} + t_{pa} + t_{p0}, \quad (2.19)$$

де T_d – час доставки вантажів у міжнародному сполученні, год;

t_n – час навантаження вантажів, год;

t_p – час транспортування вантажів, год;

t_{mk} – час проходження митного оформлення та контролю, год;

t_r – час розвантаження вантажів, год;

t_{kd} – час обслуговування на логістичному центрі, год;

t_{od} – час оформлення документів, год;

t_{pa} – час очікування транспортного засобу при митному оформленні, год;

t_{p0} – час подачі транспортного засобу (час на нульовий пробіг), год.

Витрати на оформлення заявки на перевезення партії відправки розраховується за формулою

$$V_{i,j_1} = (N_{\text{док.}} \cdot V_{\text{оф.}}) + (N_{\text{орг.}} \cdot V_{\text{он.}}), \quad (2.20)$$

де $N_{\text{док.}}$ – кількість документів для оформлення, од.;

$V_{\text{оф.}}$ – вартість оформлення одного документу, грн/од.;

$N_{\text{орг.}}$ – кількість організаційних операцій, од.;

$V_{on.}$ – вартість однієї операції, грн/од.

Витрати на формування партії відправки розраховуються за формулою

$$V_{i,j_2} = \sum_{i=1}^n (t_{форм_{1m i}} \cdot S_{форм_{1m i}} \cdot Q_{\epsilon_i}), \quad (2.21)$$

де n – кількість вантажних одиниць у партії, од.;

$t_{форм_{1m i}}$ – час формування i -ї одиниці вантажу в партії відправки, год.;

$S_{форм_{1m i}}$ – собівартість формування i -ї одиниці вантажу в партії відправки, грн/(год. т);

Q_{ϵ_i} – обсяг i -ї партії відправки, т.

Витрати на навантаження транспортного засобу розраховуються за формулою

$$V_{i,j_3} = \sum_{i=1}^n (S_{H_{1m i}} \cdot Q_{\epsilon_i}) + \sum_{i=1}^k (t_{H_i} \cdot V_{p.\epsilon_i}) + t_{\partial} \cdot V_{\partial}, \quad (2.22)$$

де k – кількість видів вантажів, од.;

$S_{H_{1m i}}$ – собівартість навантаження 1-ї тони вантажу в партії відправки, грн/т;

t_{H_i} – час навантаження i -ї одиниці вантажу в партії відправки, год.;

$V_{p.\epsilon_i}$ – ставка витрат на роботу НРМ, грн/год.;

t_{∂} – час непродуктивного простою НРМ, год.;

V_{∂} – вартість непродуктивного простою НРМ, грн/год.

Витрати на транспортування партії відправки до логістичного центру розраховується за формулою

$$V_{i,j_4} = \sum_{i=1}^e (S_{m_{\text{км}i}} \cdot L_{mi}), \quad (2.23)$$

де e – кількість ділянок маршруту, од.;

$S_{m_{\text{км}i}}$ – собівартість одного кілометра перевезення на i -й ділянці партії відправки, грн/км;

L_m – відстань i -ї ділянці перевезення партії відправки, км.

Витрати на розвантаження партії відправки на логістичному центрі розраховується за формулою

$$V_{i,j_5} = \sum_{i=1}^n (S_{p_{\text{т}mi}} \cdot Q_{\text{т}i}) + \sum_{i=1}^k (t_{p_i} \cdot V_{p.\text{т}i}) + t_{\partial} \cdot V_{\partial}, \quad (2.24)$$

де $S_{p_{\text{т}mi}}$ – собівартість розвантаження 1-ї тони одиниці вантажу в партії відправки, грн/т;

t_{p_i} – час розвантаження i -ї одиниці вантажу в партії відправки, год.

Витрати на обробку партії відправки на логістичному центрі розраховується за формулою

$$V_{i,j_6} = x_{i,j} \cdot V_{\text{роз.н}} + x_{i,j} \cdot V_{\text{с.н}} + x_{i,j} \cdot V_{\text{к.н}} + x_{i,j} \cdot V_{\text{н.н}} + x_{i,j} \cdot V_{\text{м.н}} + x_{i,j} \cdot V_{\text{н.н}} \quad (2.25)$$

де $x_{i,j}$ – бінарні змінні що вказують чи враховуються показники, $x_{i,j} \in \{0,1\}$;

$V_{\text{роз.н}}$ – витрати пов'язані з розміщенням партії вантажу на логістичному центрі, грн;

$V_{\text{с.н}}$ – витрати пов'язані з сортуванням партії вантажу, грн;

$V_{\text{к.н}}$ – витрати пов'язані з перевіркою вантажа на якість, грн;

$V_{n.n}$ – витрати пов'язані з переміщенням вантажу всередині логістичного центра, грн;

$V_{m.n}$ – витрати пов'язані з маркуванням партії вантажу, грн;

$V_{h.n}$ – витрати пов'язані з навантаженням партії вантажу, грн.

Витрати на розміщення партії вантажу на логістичному центрі розраховується за формулою

$$V_{роз.н} = \sum_{i=1}^k (N_{од_i} \cdot P_{од_i} \cdot T_{зб_i} \cdot V_{зб_i}), \quad (2.26)$$

де $N_{од_i}$ – кількість одиниць i -го вантажу, од.;

$P_{од_i}$ – площа, яку займає одна одиниця i -го вантажу, м²/од.;

$V_{зб_i}$ – вартість розміщення однієї одиниці i -го вантажу, грн/(год м²).

Витрати на сортування партії вантажу на логістичному центрі розраховується за формулою

$$V_{с.н} = \sum_{i=1}^k (N_{од_i} \cdot S_{с_i} + T_{с_i} \cdot V_{с_i}), \quad (2.27)$$

де $S_{с_i}$ – собівартість сортування однієї одиниці i -го вантажу, грн/од.

$T_{с_i}$ – час роботи сортувального механізму для i -го вантажу, год;

$V_{с_i}$ – вартість роботи сортувального механізму, грн/год.

Витрати пов'язані з перевіркою вантажа на якість на логістичному центрі розраховується за формулою

$$V_{к.н} = \sum_{i=1}^k (N_{од_i} \cdot V_{пер_i} + T_{пер_i} \cdot V_{п.пер} + V_{об_i}), \quad (2.28)$$

де $V_{пер_i}$ – вартість перевірки однієї одиниці i -го вантажу, грн/од.;
 $T_{пер_i}$ – час витрачений на перевірку якості i -го вантажу, год.;
 $V_{р.пер.}$ – витрати на заробітну плату персоналу, грн/год.;
 $V_{об_i}$ – витрати на використання обладнання для перевірки i -го вантажу, грн.

Витрати на переміщення вантажу по логістичному центрі розраховується за формулою

$$V_{n.n} = \sum_{i=1}^k (L_{n_i} \cdot S_{n_i}), \quad (2.29)$$

де L_{n_i} – відстань переміщення i -го вантажу в середині логістичного центру, км;

S_{n_i} – собівартість переміщення i -го вантажу, грн/км.

Витрати на маркування партії вантажу на логістичному центрі розраховується за формулою

$$V_{м.п} = \sum_{i=1}^k (N_{од_i} \cdot S_{м_i}), \quad (2.30)$$

де $S_{м_i}$ – собівартість маркування одиниці вантажу, грн/од.

Витрати на навантаження партії вантажу на логістичному центрі розраховується за формулою (2.22)

При обробці партії вантажу на логістичному центрі повинні виконуватися обмеження

$$\sum_{i=1}^{N_e} y_i^{exid} - \sum_{j=1}^{N_e} y_j^{suxid} = 0, \quad (2.31)$$

де $N_g = N_g$ – умова балансу вантажопотоку;

y_i^{xid} – кількість вантажних місць, які прибули до логістичного центру,

од.;

y_j^{xid} – кількість вантажних місць, які відправленні з логістичного центру, од.

Обмеження (2.31) забезпечує баланс вантажу, що надходить і йде. Воно означає, що всі товари, які надійшли на склад, мають бути або відправлені, або перерозподілені без залишку, якщо цього обмеження не дотримуються, можливі два небажаних сценарії: перший вантаж «зависає» на складі, створюючи витрати на зберігання; другий вантаж залишає крос-докінг у неповному обсязі, що призводить до недопостачання.

$$\sum_{i=1}^{N_g} y_i^{poz.} - \sum_{j=1}^{N_g} y_j^{xid.} = 0, \quad (2.32)$$

де $y_i^{poz.}$ – кількість вантажу що розміщено на логістичному центрі, т.;

y_j^{xid} – кількість вантажу що відправлено з логістичного центру, т.

Крос-докінг зазвичай передбачає мінімальне зберігання вантажу, однак тимчасове розміщення на складі все ж можливе. Обмеження (2.32) гарантує, що всі одиниці вантажу які були розміщені, повинні бути відправленні протягом встановленого періоду.

$$\sum_{i=1}^{N_g} y_i^{poz.} \cdot A_i \leq P_{к.д.}, \quad (2.33)$$

де A_i – питома площа, яку займає одна тонна вантажу i -го типу, m^2/t ,

$P_{к.д.}$ – загальна площа логістичного центру, m^2 .

Обмеження (2.33) означає що вантаж, що тимчасово зберігається, не повинен перевищувати ємність складу, якщо обсяг вантажу більший, ніж допустимий ліміт, склад перевантажується і нові надходження блокуються.

$$\sum_{i=1}^{N_6} y_i^{P.} - \sum_{j=1}^{N_6} y_j^{H.} = 0, \quad (2.34)$$

де $y_i^{P.}$ – кількість працівників задіяних при розвантаженні партії відправки, люд.;

$y_j^{H.}$ – кількість працівників задіяних при навантаженні партії відправки, люд.;

Обмеження (2.34) означає, що кількість працівників задіяних під час розвантаження, має відповідати числу працівників, які виконують навантаження, це важливо для ефективного розподілу робочої сили.

$$\sum_{i=1}^{F_{\max}} y_i^{P.} \leq R, \quad (2.35)$$

де $F_{\max}$ – максимально можлива кількість одиниць техніки, од.;

R – обмеження доступного ресурсу.

Ресурси такі як навантажувачі, конвеєри, підйомні механізми, мають обмежену кількість, обмеження (2.35) запобігає ситуації, коли попит на техніку перевищує її доступну кількість.

$$\sum_{i=1}^{N_6} y_i^{o.k.d.} \leq T_{\max}, \quad (2.36)$$

де $y_i^{o.k.d.}$ – час витрачений на обробку кожного вантажу на логістичному центрі, год.;

$T_{\max}$ – максимально допустимий час обробки вантажу на логістичному центрі, год.

Кожна логістична ланка працює в умовах жорстких часових обмежень, обмеження (2.36) визначає максимальний допустимий час обробки партії вантажу на крос-докінгу.

$$\sum_{i=1}^{N_e} y_i^{e.n} \leq \sum_{j=1}^{N_e} y_j^{e.a.}, \quad (2.37)$$

де $y_i^{e.n}$ – кількість вантажу що відправляється, т.

$y_j^{e.a.}$ – вантажопідйомність транспортного засобу, т.

Обмеження (2.37) означає, що вантаж який відправляється не повинен перевищувати вантажопідйомність транспорту.

Витрати на транспортування партії відправки до вантажоодержувача розраховується за формулою (2.23)

Витрати на митне оформлення розраховується за формулою

$$V_{\text{МИТ}}^{(s)} = \sum_{i=1}^n (V_{e_i} \cdot \frac{C_{n_i}}{100} + V_{\bar{o}_i} + V_{\partial.c_i}), \quad (2.38)$$

де V_{e_i} – вартість i -го вантажу, грн.;

C_{n_i} – ставка мита для i -го вантажу, %;

$V_{\bar{o}_i}$ – вартість брокерських послуг для i -го вантажу, грн.;

$V_{\partial.c_i}$ – додаткові витрати пов'язанні з митним оформленням для i -го вантажу, грн.

Витрати на розвантаження партії відправки у вантажоодержувача розраховується за формулою (2.24)

Витрати пов'язанні з простоем автотранспорту при митному оформленні розраховується за формулою

$$V_{\text{прст}}^{(s)} = \sum_{i=1}^n (T_{\text{про}i} \cdot V_{\text{про}i}), \quad (2.39)$$

де $T_{\text{про}i}$ – час простою транспортного засобу при митному оформленні i -го вантажу, год.

$V_{\text{про}i}$ – вартість простою транспортного засобу при митному оформленні, грн/год.

Витрати пов'язанні з «військовим ризиком» при перевезенні вантажу в регіонах де йдуть бойові дії

$$V_{\text{вп}}^{(s)} = \sum_{k=1}^n p_k \cdot L_k, \quad (2.40)$$

де p_k – імовірність настання інциденту k ;

L_k – розмір фінансових збитків у разі настання інциденту k , грн.

Запропонована формула базується на підході «очікуваної вартості», в умовах активних бойових дій цей підхід має суттєві обмеження. Він передбачає, що ймовірність p_k є відомою константою. Це кількісна оцінка ризику того, що транспортний засіб потрапить у небезпечну подію (обстріл, підриг, атака БПЛА) на конкретній ділянці маршруту. Визначається на основі статистичних даних про частоту інцидентів у заданому квадраті або на ділянці дороги. Розмір фінансових збитків визначає суму коштів, яка буде втрачена у разі успішної атаки ворога на транспортний засіб, та розраховується, як вартість вантажу та вартість транспортного засобу.

Проте війна – це динамічний процес, де рівень загрози на конкретній ділянці дороги може змінюватися щогодини (наприклад, під час повітряної тривоги або прориву лінії фронту). Формула не враховує каскадних ефектів. Знищення вантажівки з комплектуючими на кордоні може призвести до зупинки цілого заводу, що робить L_k нелінійною величиною, яка значно перевищує вартість самого вантажу. Незважаючи на ці обмеження, саме введення цієї змінної в рівняння загальних логістичних витрат є важливим кроком, що дозволяє легітимізувати витрати на безпеку (наприклад, дорожчі маршрути в обхід небезпечних зон) як економічно обґрунтовані.

Важливим завданням є перехід від статичної оцінки ризику (середня по країні) до динамічної топологічної оцінки. Ризик не є рівномірно розподіленим. Він концентрується вздовж ліній зіткнення, навколо критичної інфраструктури (мостів, портів) та змінюється в часі. Використання сучасних платформ даних, таких як розроблена Marsh McLennan для України, дозволяє накладати «теплову мапу» інцидентів (рис. 2.15) на граф транспортної мережі, перетворюючи задачу маршрутизації на задачу обходу зон високої ймовірності ураження в реальному часі.

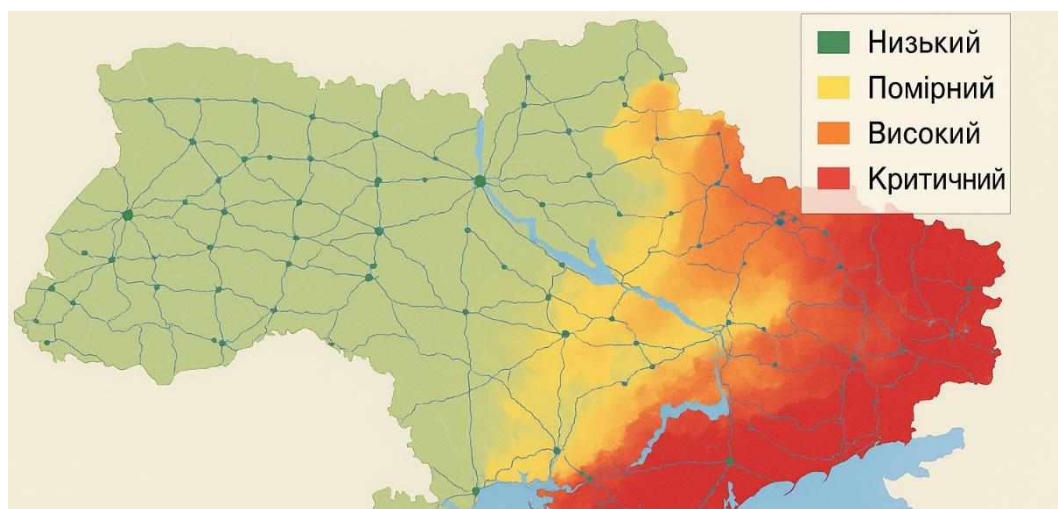


Рисунок 2.15 – «Теплова мапа» рівнів «військового ризику» на території України

Для інтеграції в програмні модулі «LogisticsSim» запропоновано використовувати показник «індекс динамічної вразливості маршруту». Цей показник дозволяє оцінити ризик конкретної ділянки маршруту на основі геопросторових даних та розраховується за формулою

$$R_{\text{дин}}(i, t) = \left(\frac{I_{\text{кінетичний}}(i, t)}{D_{\text{фронт}}(i, t) + \epsilon} \right) \cdot K_{\text{інфра}} \cdot (1 + K_{\text{дрон}}), \quad (2.41)$$

де i – індекс просторової дискретизації маршруту, що визначає i -й сегмент транспортного графа;

t – індекс часової дискретизації, що характеризує поточний момент оцінювання оперативної обстановки;

$I_{\text{кінетичний}}(i, t)$ – коефіцієнт інтенсивності кінетичних подій (обстрілів).

Нормоване значення (0–1), отримане з платформ моніторингу війни;

$D_{\text{фронт}}(i, t)$ – відстань у кілометрах до лінії бойового зіткнення або кордону, км;

ϵ – константа згладжування, що запобігає діленню на нуль, якщо ТЗ знаходиться прямо на лінії бойового зіткнення або кордоні, км;

$K_{\text{інфра}}$ – коефіцієнт критичності інфраструктури, якщо маршрут проходить через стратегічний міст або поблизу важливого об'єкту, то $K_{\text{інфра}} > 1$;

$K_{\text{дрон}}$ – коефіцієнт загрози БПЛА (безпілотний літальний апарат).

«Індекс динамічної вразливості маршруту» являє собою інтегральну оцінку небезпеки проходження конкретної ділянки маршруту в заданий момент часу. Фізичний зміст цього показника можливо інтерпретувати як «щільність загрози на одиницю дистанції від джерела небезпеки». Чим вище значення цього показника, тим небезпечнішим є сегмент маршруту.

Коефіцієнт інтенсивності кінетичних подій – це безрозмірна нормована величина, яка змінюється в діапазоні від 0 до 1. Її сутність полягає у

відображенні поточної бойової активності – значення, близьке до нуля, свідчить про відсутність загрози, тоді як одиниця означає максимальну інтенсивність обстрілів згідно з даними платформ моніторингу війни.

Знаменник дробу формує відстань до лінії бойового зіткнення або кордону, яка вимірюється в кілометрах. Сутність цього показника полягає у зворотно-пропорційній залежності ризику від відстані – чим ближче транспортний засіб до лінії фронту, тим меншим є знаменник і, відповідно, різко зростає загальний показник ризику. Для коректності розрахунків до відстані додається константа згладжування, яка також має розмірність у кілометрах. Її математична роль – запобігти діленню на нуль у випадку, якщо транспорт знаходиться безпосередньо на лінії зіткнення, а фізична сутність – відобразити залишковий, але скінченний рівень ризику навіть у епіцентрі подій.

Вагомим множником у формулі виступає коефіцієнт критичності інфраструктури, який є безрозмірною величиною. Його сутність полягає у врахуванні додаткових загроз, не пов'язаних прямо з маршрутом, а спричинених сусідством зі стратегічними об'єктами (мостами, електростанціями, і так далі), які притягують ворожі удари. Якщо маршрут проходить поруч з такими об'єктами, цей коефіцієнт стає більшим за одиницю, масштабуючи загальний ризик. Для коректної інтерпретації воєнно-операційних ризиків доцільно здійснювати класифікацію ділянок маршруту за рівнем антропогенно-воєнного навантаження. Така класифікація слугує основою для параметризації коефіцієнта критичності інфраструктури, значення якого визначаються на основі оверлейного просторового аналізу – шляхом накладання дорожньої мережі на геопросторові шари об'єктів критичної інфраструктури, промислових вузлів та інших потенційно вразливих елементів. Базовий рівень $K_{інфра}=1$, до цієї групи відносять сегменти маршруту, що пролягають поза межами зон впливу стратегічно важливих об'єктів, це, зокрема, ділянки автомобільних доріг загального користування або польові дороги, розташовані на відстані від промислових

агломерацій. Підвищений рівень $K_{інфра} \in [1,2;1,5]$, до даної категорії належать сегменти транспортного графа, що проходять у безпосередній близькості від промислових зон, залізничних вузлів, підстанцій, логістичних терміналів або адміністративних будівель. Критичний рівень $K_{інфра} \in [2;3]$, до цієї категорії включають сегменти, що інтегровані у структуру критичної транспортної інфраструктури, це мостові переходи через основні водні перешкоди, гідротехнічні споруди (наприклад, дамби ГЕС), естакади поблизу ТЕЦ або АЕС та інші стратегічні об'єкти.

Останній елемент коефіцієнт загрози БПЛА, це безрозмірна величина, яка додається до одиниці, що означає навіть за відсутності інших загроз базовий ризик збільшується пропорційно насиченості повітряного простору дронами. Значення коефіцієнта визначаються за принципом нормованої шкали, де кожна категорія відповідає певному рівню тактичної загрози – $K_{дрон} = 0$ відсутність підтверджених відомостей щодо повітряної активності або її незначний рівень, $K_{дрон} = 0,2$ виявлення розвідувальних БПЛА, що може свідчити про потенційне коригування вогню, $K_{дрон} = 0,5$ присутність ударних дронів типу шахед у відповідному секторі місцевості, $K_{дрон} = 1$ фіксація FPV-дронів, які становлять найбільшу ймовірність прямого ураження транспортних засобів.

Усі оперативно залежні компоненти моделі – інтенсивність кінетичних подій, наближення до лінії фронту, коефіцієнт критичності інфраструктури та коефіцієнт загрози БПЛА – оцінюються на основі даних за попередні 24 години. Використання добового інтервалу згладжує випадкові стрибки оперативної інформації та забезпечує більш достовірне відображення реальних умов ризику для транспортного процесу.

Практична сутність для логіста полягає в тому, що ця математична модель перетворює абстрактне поняття «небезпеки» на конкретне числове значення. Це дозволяє автоматизовано порівнювати різні варіанти маршрутів – логіст обирає шлях з найменшим сумарним значенням цього показника,

навіть якщо цей шлях фізично довший. Також модель дозволяє динамічно змінювати маршрут у реальному часі – якщо на певній ділянці зростає інтенсивність обстрілів, або активність дронів, система перерахує ризик і запропонує безпечніший об'їзд, що є критичним для збереження вантажу, транспорту та життя водія.

Ефективність запропонованої математичної моделі критично залежить від якості, актуальності та достовірності вхідних даних. Специфіка транспортних операцій в умовах воєнного стану вимагає переходу від статичних баз даних до гібридних інформаційних потоків, що поєднують геопросторові дані високої точності з оперативною інформацією з відкритих джерел. Обґрунтування вибору джерел та методів отримання даних для кожної групи параметрів представлено в таблиці 2.4.

Таблиця 2.4 – Джерела вхідних даних для розрахунку динамічного показника ризику

Параметр формули	Джерело отримання даних	Релевантність та метод обробки для логіста
Інтенсивність обстрілів	1. OSINT-платформи – DeepStateMap, Liveuamap 2. Офіційні зведення – Генштаб ЗСУ, телеграм-канали ОВА (Обласних військових адміністрацій) 3. Системи сповіщення «Повітряна тривога»	Висока динаміка. Дані потребують автоматизованої обробки. Релевантність визначається часом оновлення – для моделі важливі події за останні 24-48 годин. Чим більше повідомлень про вибухи на ділянці маршруту, тим ближче коефіцієнт до 1,0
Відстань до лінії бойового зіткнення або кордону	1. Векторні мапи – Google Maps API 2. Зони бойових дій з порталу DeepState (лінія фронту) 3. Інститути вивчення війни ISW (Institute for the Study of War) звіти та мапи	Геопросторова основа. Логістична система накладає маршрут на мапу, автоматично вимірює найкоротшу відстань (по перпендикуляру) від кожної точки маршруту до полігону «окупована територія» або «сіра зона». Оновлення – щоденно
Критичність інфраструктури	1. Картографічні сервіси 2. Державні реєстри. Переліки об'єктів критичної інфраструктури 3. Інформація, щодо попередніх атак на інфраструктуру	Статична загроза. Система ідентифікує, чи проходить дорога ближче ніж 500 м від ТЕЦ або стратегічного мосту. Якщо так – коефіцієнт зростає. Релевантність висока, оскільки ворог часто б'є по одних і тих самих координатах

Продовження таблиці 2.4

Параметр формули	Джерело отримання даних	Релевантність та метод обробки для логіста
Загроза БПЛА	1. Спеціалізовані моніторингові канали – телеграм-канали	Найскладніший для оцифрування параметр. Для цивільної логістики часто використовується імовірнісний підхід – якщо в районі оголошено «загрозу застосування балістики/БПЛА», параметр автоматично підвищується для всього регіону або конкретного району

Загальний вигляд математичної моделі можливо представити наступним чином (формула 2.42).

$$\begin{aligned}
 V_{\text{заг}}^{(s)} = & (N_{\text{док.}} \cdot V_{\text{оф.}}) + (N_{\text{орз.}} \cdot V_{\text{он.}}) + \sum_{i=1}^n (t_{\text{форм.} \cdot \text{л} \cdot \text{м} \cdot \text{и}} \cdot S_{\text{форм.} \cdot \text{л} \cdot \text{м} \cdot \text{и}} \cdot Q_{\varepsilon_i}) + \\
 & + \sum_{i=1}^n (S_{\text{н} \cdot \text{л} \cdot \text{м} \cdot \text{и}} \cdot Q_{\varepsilon_i}) + \sum_{i=1}^k (t_{\text{н} \cdot \text{и}} \cdot V_{\text{р.} \cdot \varepsilon_i}) + t_{\delta} \cdot V_{\delta} + \sum_{i=1}^e (S_{\text{м} \cdot \text{л} \cdot \text{к} \cdot \text{м} \cdot \text{и}} \cdot L_{\text{м} \cdot \text{и}}) + \\
 & + \sum_{i=1}^n (S_{\text{р} \cdot \text{л} \cdot \text{м} \cdot \text{и}} \cdot Q_{\varepsilon_i}) + \sum_{i=1}^k (t_{\text{р} \cdot \text{и}} \cdot V_{\text{р.} \cdot \varepsilon_i}) + t_{\delta} \cdot V_{\delta} + x_{i,j} \cdot \sum_{i=1}^k (N_{\text{од} \cdot \text{и}} \cdot P_{\text{од} \cdot \text{и}} \cdot T_{\text{з} \cdot \delta \cdot \text{и}} \cdot V_{\text{з} \cdot \delta \cdot \text{и}}) + \\
 & + x_{i,j} \cdot \sum_{i=1}^k (N_{\text{од} \cdot \text{и}} \cdot S_{\text{с} \cdot \text{и}} + T_{\text{с} \cdot \text{и}} \cdot V_{\text{с} \cdot \text{и}}) + x_{i,j} \cdot \sum_{i=1}^k (N_{\text{од} \cdot \text{и}} \cdot V_{\text{нер} \cdot \text{и}} + T_{\text{нер} \cdot \text{и}} \cdot V_{\text{р.} \cdot \text{нер} \cdot \text{и}} + V_{\text{об} \cdot \text{и}}) + \\
 & + x_{i,j} \cdot \sum_{i=1}^k (L_{\text{н} \cdot \text{и}} \cdot S_{\text{н} \cdot \text{и}}) + x_{i,j} \cdot \sum_{i=1}^k (N_{\text{од} \cdot \text{и}} \cdot S_{\text{м} \cdot \text{и}}) + x_{i,j} \cdot \sum_{i=1}^n (S_{\text{н} \cdot \text{л} \cdot \text{м} \cdot \text{и}} \cdot Q_{\varepsilon_i}) + \\
 & + \sum_{i=1}^k (t_{\text{н} \cdot \text{и}} \cdot V_{\text{р.} \cdot \varepsilon_i}) + t_{\delta} \cdot V_{\delta} + \sum_{i=1}^e (S_{\text{м} \cdot \text{л} \cdot \text{к} \cdot \text{м} \cdot \text{и}} \cdot L_{\text{м} \cdot \text{и}}) + \sum_{i=1}^n (V_{\varepsilon_i} \cdot \frac{C_{\text{н} \cdot \text{и}}}{100} + V_{\delta \cdot \text{и}} + V_{\delta \cdot \text{с} \cdot \text{и}}) + \\
 & + \sum_{i=1}^n (T_{\text{нро} \cdot \text{и}} \cdot V_{\text{нро.}}) + \sum_{i=1}^n (S_{\text{р} \cdot \text{л} \cdot \text{м} \cdot \text{и}} \cdot Q_{\varepsilon_i}) + \sum_{i=1}^k (t_{\text{р} \cdot \text{и}} \cdot V_{\text{р.} \cdot \varepsilon_i}) + t_{\delta} \cdot V_{\delta} + \sum_{k=1}^n p_k \cdot L_k
 \end{aligned} \tag{2.42}$$

Для того, щоб результати оптимізації були реалістичними та практично застосовними, модель повинна враховувати фізичні, ресурсні та часові обмеження, в межах яких функціонує логістична система. Ці обмеження переважно стосуються роботи логістичних центрів, оскільки саме вони є вузлами, де виникає конкуренція за ресурси і потенційні «вузькі місця».

В загальному вигляді система обмежень має вигляд (2.42). Ця система обмежень виконує функцію «перевірки на реальність». Вона створює область допустимих рішень, гарантуючи, що обрана за критерієм мінімуму витрат схема є операційно можливою. Звісно для визначення доцільної схеми доставки вантажу використовуються інші обмеження та допущення, що притаманні задачі вибору оптимального маршруту для вантажного автомобіля, особливо в міжнародному сполученні, які є класичною задачею маршрутизації транспорту.

$$\left\{ \begin{array}{l} \sum_{i=1}^{N_g} y_i^{exid} - \sum_{j=1}^{N_g} y_j^{exid} = 0 \\ \sum_{i=1}^{N_g} y_i^{poz.} - \sum_{j=1}^{N_g} y_j^{eid.} = 0 \\ \sum_{i=1}^{N_g} y_i^{poz.} \leq P_{\kappa.\partial.} \\ \sum_{i=1}^{N_g} y_i^{p.} - \sum_{j=1}^{N_g} y_j^{h.} = 0 \\ \sum_{i=1}^{F_{\max}} y_i^{p.} \leq R \\ \sum_{i=1}^{N_g} y_i^{o.\kappa.\partial.} \leq T_{\max} \\ \sum_{i=1}^{N_g} y_i^{e.n} \leq \sum_{j=1}^{N_g} y_j^{e.a.} \end{array} \right. \quad (2.43)$$

Стандартна система обмежень для такої задачі є багатокomпонентною і враховує фізичні, часові, юридичні та операційні аспекти перевезення. Без цих обмежень модель могла б генерувати абсурдні з фізичної точки зору рішення. Таким чином, система обмежень є невід'ємною частиною математичної постановки, що забезпечує її практичну цінність та адекватність.

Для забезпечення універсальності та практичної застосовності розроблених методів, в основі моделювання та порівняння транспортно-

технологічних схем доставки лежить логіка розподілу відповідальності та витрат, що відповідає міжнародним правилам Incoterms. Хоча розроблені моделі є гнучкими для адаптації під будь-які комерційні умови, для даного дослідження в якості базового обрано термін FCA (Free Carrier / Франко-перевізник).

Вибір саме цього терміну обумовлений його універсальністю, гнучкістю та повною сумісністю з усіма чотирма аналізованими схемами доставки, що робить його ідеальною основою для порівняльного аналізу:

- чіткий та логічний розподіл відповідальності. Правило FCA встановлює чітку межу переходу ризиків та витрат від продавця (вантажовідправника) до покупця (вантажодержувача). Відповідальність продавця завершується в момент передачі товару перевізнику, найнятому покупцем, після виконання експортних митних формальностей та завантаження на транспортний засіб. Такий чіткий розподіл ідеально відповідає методології даної роботи, яка базується на декомпозиції всього логістичного ланцюга на окремі операції для точного розрахунку витрат і часу;

- гнучкість та відповідність сучасним логістичним схемам. FCA є надзвичайно гнучким терміном, оскільки «узгодженим місцем» передачі товару може бути не тільки склад відправника, але й будь-який інший пункт, наприклад, логістичний центр або термінал;

- практичність для міжнародних автомобільних перевезень. На відміну від терміну EXW, де обов'язки з експортного оформлення та завантаження покладаються на покупця (що часто є непрактичним), FCA покладає ці операції на продавця, який може виконати їх найефективніше у своїй країні. Це робить FCA одним із найпоширеніших та рекомендованих термінів для автомобільних перевезень.

2.5 Висновки по розділу 2

1. Встановлено, що ефективність міжнародних автомобільних перевезень безпосередньо залежить від рівня цифровізації логістичних операцій та інтегрованості інформаційних систем між учасниками ланцюга постачання. На основі аналізу сучасних практик обґрунтовано необхідність переходу від фрагментованого обміну даними до єдиної інформаційної моделі з використанням електронних документів, що забезпечує зменшення операційних затримок, підвищення прозорості та мінімізацію помилок при оформленні вантажів. Доведено, що формування цифрового інформаційного ядра є базовою умовою для побудови раціональних транспортно-технологічних схем доставки.

2. Проведений аналіз показав, що технологія крос-докінгу є ключовим інструментом зменшення часу доставки та оптимізації структури витрат при обробці дрібнопартійних вантажів. Обґрунтовано, що застосування крос-докінгу дозволяє мінімізувати складські операції, скоротити тривалість перебування вантажу в системі та сформувати більш стабільні магістральні потоки. Показано, що оптимізація операцій крос-докінгу потребує формального опису технологічних процесів, врахування ритмічності прибуття транспортних засобів та синхронізації дій учасників, що є передумовою створення математичної моделі узгоджених логістичних операцій.

3. Встановлено, що ключовим чинником ефективності крос-докінгу є рівень координації між перевізниками, логістичними центрами та вантажоодержувачами. Доведено, що застосування цифрових платформ управління, автоматизованого планування графіків прибуття або відправлення та систем моніторингу завантаження доків дозволяє мінімізувати конфлікти ресурсів та запобігати «вузьким місцям». Визначено, що декомпозиція логістичного процесу на операції з присвоєнням кожній

компоненті власних параметрів часу та витрат створює основу для подальшої математичної оптимізації вибору транспортно-технологічної схеми.

4. Сформовано комплексний методичний підхід до вибору раціональної транспортно-технологічної схеми міжнародної доставки вантажів, який базується на декомпозиції логістичного процесу на окремі операції, параметризації їх тривалості та вартості, а також інтеграції сучасних факторів невизначеності. Одним із ключових елементів цього підходу є включення до структури витрат показника військового ризику, що становить важливий внесок у контексті функціонування логістичних систем України в умовах збройної агресії. Показано, що традиційні моделі вибору логістичної схеми ґрунтувалися на детермінованих або усереднених оцінках ризику, які не відображають просторову нерівномірність та швидку змінність рівня загроз, обґрунтовано необхідність переходу до динамічної топологічної оцінки військового ризику

РОЗДІЛ 3

РОЗРОБКА ІНФОРМАЦІЙНИХ ТЕХНОЛОГІЙ ПІДТРИМКИ ПРИЙНЯТТЯ РІШЕНЬ В УПРАВЛІННІ МІЖНАРОДНИМИ ПЕРЕВЕЗЕННЯМИ

3.1 Розробка імітаційної моделі для порівняльного аналізу сценаріїв доставки вантажів

В умовах глобалізації економіки та інтенсифікації міжнародної торгівлі, ефективність управління ланцюгами постачання стає ключовим фактором конкурентоспроможності підприємств. Міжнародні перевезення вантажів, як невід'ємна складова цих ланцюгів, характеризуються значною складністю, зумовленою великими відстанями, необхідністю перетину державних кордонів, відмінностями в транспортній інфраструктурі та нормативно-правовому регулюванні різних країн, а також впливом численних економічних, політичних та безпекових ризиків. Автомобільний транспорт, незважаючи на свою гнучкість та можливість доставки «від дверей до дверей», особливо чутливий до цих факторів при здійсненні міжнародних рейсів.

Оцінка та порівняння ефективності різних логістичних стратегій та сценаріїв організації міжнародних автомобільних перевезень є складною управлінською задачею. Вибір між прямою доставкою, використанням консолідаційних складів або логістичних центрів (ЛЦ) з функцією крос-докінгу в країні відправлення чи призначення суттєво впливає як на загальні логістичні витрати, так і на загальний час доставки. Традиційні методи калькуляції часто є недостатньо гнучкими для врахування всієї сукупності витратних компонентів (транспортні тарифи, термінальна обробка, митне оформлення, страхування, складські операції) та часових параметрів (час руху, обробки, простоїв, митних процедур).

Особливої гостроти ця проблема набуває в контексті сучасних геополітичних викликів. Нестабільність, локальні та регіональні конфлікти

(зокрема, повномасштабна війна в Україні) генерують значні воєнні ризики, які безпосередньо впливають на вартість та можливість здійснення міжнародних перевезень через відповідні регіони. Ігнорування цих ризиків при плануванні призводить до суттєвих фінансових втрат та зривів поставок.

Таким чином, існує нагальна потреба у розробці спеціалізованих інструментальних засобів, зокрема, імітаційних моделей, які б дозволяли:

- детально розраховувати сукупні витрати та час доставки для різних сценаріїв міжнародних автоперевезень;
- враховувати широкий спектр параметрів, включаючи специфічні для міжнародної логістики компоненти та ризики;
- проводити порівняльний аналіз альтернативних логістичних схем для підтримки прийняття обґрунтованих рішень щодо оптимізації міжнародних вантажопотоків.

Аналіз існуючих програмних засобів та методик розрахунку логістичних витрат часто виявляє їх недостатню гнучкість та рівень деталізації, особливо при моделюванні складних міжнародних ланцюгів постачання [140]. Багато інструментів оперують узагальненими або агрегованими показниками витрат (наприклад, загальні «складські витрати» або «адміністративні витрати»), що не дозволяє точно оцінити вплив зміни окремих операцій чи використання різної інфраструктури. Це особливо критично при порівнянні принципово різних логістичних сценаріїв та при врахуванні специфічних транскордонних операцій і ризиків.

Для вирішення поставленої задачі було розроблено програмний продукт «LogisticsSim» (лістинг програми представлено в додатку В) – систему імітаційного моделювання, реалізовану мовою Python з використанням графічного інтерфейсу Tkinter [141].

Застосовано підхід детальної декомпозиції загального процесу доставки на окремі логістичні операції та відповідні їм складові витрат і часу. Ключовою перевагою розробленої моделі порівняно з багатьма існуючими підходами є саме високий ступінь цієї деталізації. Замість агрегованих

показників, модель оперує конкретними компонентами: витрати на оформлення заявки, документація (розрахована на одиницю), формування партії (для прямого сценарію), консолідація (в ЛЦ), пакування, маркування, перевірка якості, навантаження–розвантаження в різних точках (відправник, ЛЦ, отримувач), транспортування (за тарифом/км), страхування, обробка в ЛЦ, митне оформлення (окремо експорт/імпорт), митні збори, воєнні ризики, непередбачені витрати. Аналогічна деталізація застосована і до часових параметрів. Така гранулярність дозволяє значно підвищити точність та реалістичність моделювання. Вона дає можливість врахувати специфічні операційні відмінності між логістичними сценаріями (наприклад, поява витрат на обробку в ЛЦ при одночасному зникненні витрат на формування великої партії у відправника) та більш точно оцінити вплив зміни вартості чи тривалості конкретної операції на загальні показники ефективності перевезення. Це, своєю чергою, забезпечує надійнішу основу для порівняльного аналізу та виявлення справжніх драйверів витрат або часових «вузьких місць» для кожного сценарію.

Ключові характеристики та функціональні можливості «LogisticsSim»:

- деталізована модель витрат, програма дозволяє вводити та враховувати численні компоненти витрат, характерні для міжнародних перевезень;
- моделювання часу доставки, розрахунок загального часу та тривалості окремих етапів: час на підготовчій операції (формування партії для прямого варіанту, документація), час на вантажно-розвантажувальні роботи (у відправника, отримувача, ЛЦ), час на обробку в ЛЦ (крос-докінг), час на митне оформлення (експорт та імпорт), час на перетин кордону, час руху транспортного засобу: розраховується на основі відстаней сегментів маршруту, середньої швидкості руху та врахування нормативного режиму праці та відпочинку водія (наприклад, денний ліміт водіння та обов'язковий щоденний відпочинок, що наближує модель до вимог міжнародних угод типу

AETR), час на можливі непередбачені затримки (як відсоток від розрахункового часу);

- сценарний аналіз, реалізовано одночасний розрахунок та порівняння 4-х сценаріїв: пряма доставка, використання ЛЦ в країні відправлення, використання ЛЦ в країні призначення, використання ЛЦ в обох країнах. Це дозволяє оцінити вплив інфраструктурних рішень на ефективність перевезення;

- гнучке введення даних, всі параметри (відстані, тарифи, нормативи часу, ставки, відсотки) вводяться користувачем через графічний інтерфейс, що забезпечує адаптацію моделі до конкретних умов перевезення, маршруту та типу вантажу;

- збереження та завантаження параметрів, можливість зберегти повний набір введених параметрів у файл формату JSON та завантажити їх для подальших розрахунків чи модифікації. Це зручно для роботи з типовими маршрутами або для проведення серії експериментів;

- експорт результатів, можливість зберегти деталізовані таблиці з результатами розрахунку витрат та часу у файли формату CSV, що дозволяє легко імпортувати їх в інші програми (напр., MS Excel, Google Sheets) для подальшого аналізу, побудови графіків чи включення у звіти;

- інтерфейс користувача програма має двовіконну структуру (на кожній вкладці) з розділенням на зону вводу даних та зону відображення результатів. На вкладці витрат у зоні вводу даних інтегровано невелике тематичне зображення.

Функціонування «LogisticsSim» базується на чітко визначеному циклі взаємодії користувача з системою та внутрішньої обробки даних:

- перший крок, запуск та ініціалізація «LogisticsSim» при старті програми створюється головне вікно та основні елементи інтерфейсу (вкладки, панелі, початкове зображення).

- другий крок, введення або завантаження параметрів користувач переходить на потрібну вкладку («Розрахунок витрат» або «Розрахунок

часу»), у верхній прокручуваній зоні вводу користувач вводить або коригує параметри моделювання для конкретного перевезення (відстані, кількість/вага/вартість вантажу, тарифи, ставки, норми часу, відсотки ризиків тощо). Альтернативно, користувач натискає кнопку «Завантажити вхідні дані», вибирає раніше збережений JSON-файл, і програма автоматично заповнює поля вводу даними з файлу (рис. 3.1).

Рисунок 3.1 – Інтерфейс розробленого програмного забезпечення (вкладка розрахунок витрат, введення вхідних даних)

– третій крок ініціація розрахунку, користувач натискає кнопку «Розрахувати витрати» або «Розрахувати час». Це є подією, яка запускає відповідний обробник – метод `calculate_costs` або `calculate_tim` зчитує поточні значення з усіх полів вводу, перевіряється можливість конвертації введених значень у числовий формат. Виконується послідовний розрахунок значень для кожної складової витрат/часу для кожного з чотирьох сценаріїв відповідно до закладених формул (з урахуванням специфіки сценаріїв – використання ЛЦ, пряма доставка, застосування відповідних відстаней та операцій). Розраховуються транспортні витрати, витрати на обробку, митні платежі, страхування, воєнні ризики, час руху (з урахуванням відпочинку),

час операцій тощо. Розраховані компоненти сумуються для отримання проміжних та загальних показників витрат/часу для кожного сценарію. Розраховуються непередбачені витрати/затримки. Результати форматуються до заданої кількості десяткових знаків (рис. 3.2-3.3).



Розрахунок витрат Розрахунок часу

Вхідні дані для розрахунку витрат

Результати розрахунку витрат

Розрахувати витрати Зберегти результати витрат (CSV)

Складові витрат	Сценарій 1 (Прямий)	Сценарій 2 (ЛЦ Відправлення)	Сценарій 3 (ЛЦ Призначення)	Сценарій 4 (Обидва ЛЦ)
Витрати на оформлення заявок (загальні)	500.00	500.00	500.00	500.00
Витрати на оформлення документів (загальні)	1000.00	1000.00	1000.00	1000.00
Витрати на формування партії (Прямий)	5000.00	0.00	0.00	0.00
Витрати на консолідацію (в ЛЦ)	0.00	20.00	20.00	20.00
Витрати на пакування (загальні)	5000.00	5000.00	5000.00	5000.00
Витрати на маркування (загальні)	100.00	100.00	100.00	100.00
Витрати на перевірку якості (загальні)	200.00	200.00	200.00	200.00
Витрати на навантаження (Відправник, загальні)	30.00	30.00	30.00	30.00
Витрати на транспортування	26000.00	26000.00	26000.00	26000.00
Витрати на розвантаження (ЛЦ Відправлення)	0.00	40.00	0.00	40.00
Витрати на обробку (ЛЦ Відправлення)	0.00	50.00	0.00	50.00
Витрати на навантаження (ЛЦ Відправлення)	0.00	40.00	0.00	40.00
Витрати на розвантаження (ЛЦ Призначення)	0.00	0.00	40.00	40.00
Витрати на обробку (ЛЦ Призначення)	0.00	0.00	50.00	50.00
Витрати на навантаження (ЛЦ Призначення)	0.00	0.00	40.00	40.00
Витрати на розвантаження (Отримувач, загальні)	30.00	30.00	30.00	30.00
Витрати на митне оформлення (Експорт)	50000.00	50000.00	50000.00	50000.00
Витрати на митне оформлення (Імпорт)	0.00	0.00	0.00	0.00
Витрати на митні збори (%)	2700.00	2700.00	2700.00	2700.00
Витрати на страхування	1500.00	1500.00	1500.00	1500.00
Витрати на воєнні ризики	6000.00	6000.00	6000.00	6000.00
ПРОМІЖНА СУМА	98060.00	93210.00	93210.00	93340.00
Непередбачені витрати	5883.60	5592.60	5592.60	5600.40
ЗАГАЛЬНІ ВИТРАТИ	103943.60	98802.60	98802.60	98940.40

Рисунок 3.2 – Інтерфейс розробленого програмного забезпечення (вкладка розрахунок витрат, представлення розрахунків витрат по кожному з 4 сценаріїв)

– четвертий крок – візуалізація результатів, збереження параметрів, при натисканні «Зберегти вхідні дані» поточні значення з полів вводу зберігаються в JSON.

– п'ятий крок експорт результатів, при натисканні «Зберегти результати» дані з відповідної таблиці Treeview (заголовки та всі рядки) експортуються у файл CSV.

Цей цикл дозволяє користувачеві ітеративно змінювати параметри, проводити розрахунки та аналізувати вплив змін на кінцеві показники

ефективності міжнародного перевезення за різними сценаріями. Продукт виступає як інструмент підтримки прийняття рішень, що базується на імітаційному моделюванні логістичного процесу.



Етап доставки	Сценарій 1 (Прямий, год)	Сценарій 2 (ЛЦ Відпр., год)	Сценарій 3 (ЛЦ Призн., год)	Сценарій 4 (Обидва ЛЦ, год)
Час на оформлення документів (загальний)	2.00	2.00	2.00	2.00
Час на формування партії (Прямий, загальний)	5.00	0.00	5.00	0.00
Час на навантаження (Відправник, загальний)	4.00	4.00	4.00	4.00
Час у дорозі (з відпочинком)	43.67	43.67	43.67	43.67
Час на розвантаження (ЛЦ Відправлення)	0.00	2.00	0.00	2.00
Час на обробку (ЛЦ Відправлення, загальний)	0.00	6.00	0.00	6.00
Час на навантаження (ЛЦ Відправлення)	0.00	2.00	0.00	2.00
Час на перетин кордону	2.00	2.00	2.00	2.00
Час на митне оформлення (Експорт)	8.00	8.00	8.00	8.00
Час на митне оформлення (Імпорт)	12.00	12.00	12.00	12.00
Час на розвантаження (ЛЦ Призначення)	0.00	0.00	2.00	2.00
Час на обробку (ЛЦ Призначення, загальний)	0.00	0.00	6.00	6.00
Час на навантаження (ЛЦ Призначення)	0.00	0.00	2.00	2.00
Час на розвантаження (Отримувач, загальний)	4.00	4.00	4.00	4.00
ПРОМІЖНИЙ ЧАС (год)	80.67	85.67	90.67	95.67
Можливі затримки (год)	1.61	1.71	1.81	1.91
ЗАГАЛЬНИЙ ЧАС (год)	82.28	87.38	92.48	97.58
ЗАГАЛЬНИЙ ЧАС (дні)	3.43	3.64	3.85	4.07

Рисунок 3.3 – Інтерфейс розробленого програмного забезпечення (вкладка розрахунок часу, представлення розрахунку загального часу доставки по кожному з 4 сценаріїв)

Ключовою перевагою розробленого інструментарію є високий ступінь деталізації компонентів витрат і часу, що дозволяє підвищити точність моделювання складних міжнародних логістичних ланцюгів, проводити глибокий аналіз чутливості та виявляти основні драйвери витрат. Це забезпечує користувачів надійною інформаційною базою для порівняння альтернативних сценаріїв доставки та прийняття більш обґрунтованих рішень щодо оптимізації міжнародних вантажопотоків, особливо в умовах підвищених ризиків.

3.2 Розробка імітаційної моделі для аналізу ефективності крос-докінгових операцій на логістичному центрі

Ефективність міжнародних автомобільних вантажних перевезень значною мірою залежить від швидкості та вартості обробки вантажів у пунктах перевантаження, зокрема в логістичних центрах, що працюють за технологією крос-докінг. Ця технологія, спрямована на мінімізацію або повне виключення етапу зберігання, є ключовою для консолідації та деконсолідації міжнародних вантажопотоків, оптимізації маршрутів та скорочення часу доставки. Однак, планування та управління крос-докінговими операціями є складним завданням через динамічний характер процесів, обмеженість ресурсів (доки, персонал, техніка) та необхідність синхронізації вхідних і вихідних потоків.

Аналітичні методи розрахунку часто не дозволяють врахувати стохастичність прибуття транспорту, взаємодію процесів, утворення черг та вплив обмежених ресурсів на загальну продуктивність і витрати. Тому для глибокого аналізу та пошуку шляхів оптимізації крос-докінгових операцій в контексті міжнародних перевезень доцільно використовувати інструменти імітаційного моделювання. Розроблений програмний продукт «Симулятор Крос-Докінгу» (лістинг програми представлено в додатку Г) є гнучкою імітаційною моделлю яка дозволяє комплексно аналізувати ефективність операцій крос-докінга на логістичному центрі (рис 3.4).

В основі розробленого програмного забезпечення лежить метод дискретно-подієвого імітаційного моделювання (Discrete-Event Simulation) [142]. Цей підхід дозволяє відтворити динаміку системи шляхом моделювання послідовності ключових подій, що відбуваються в системі в дискретні моменти часу, цей метод є адекватним інструментом для аналізу систем масового обслуговування, до яких належать і логістичні центри, оскільки він дозволяє враховувати: динаміку прибуття, обмеженість ресурсів, утворення черг, очікування автомобілями вільного доку або необхідних

ресурсів, взаємодію процесів (залежності між розвантаженням вхідних та завантаженням вихідних автомобілів), тривалість операцій.

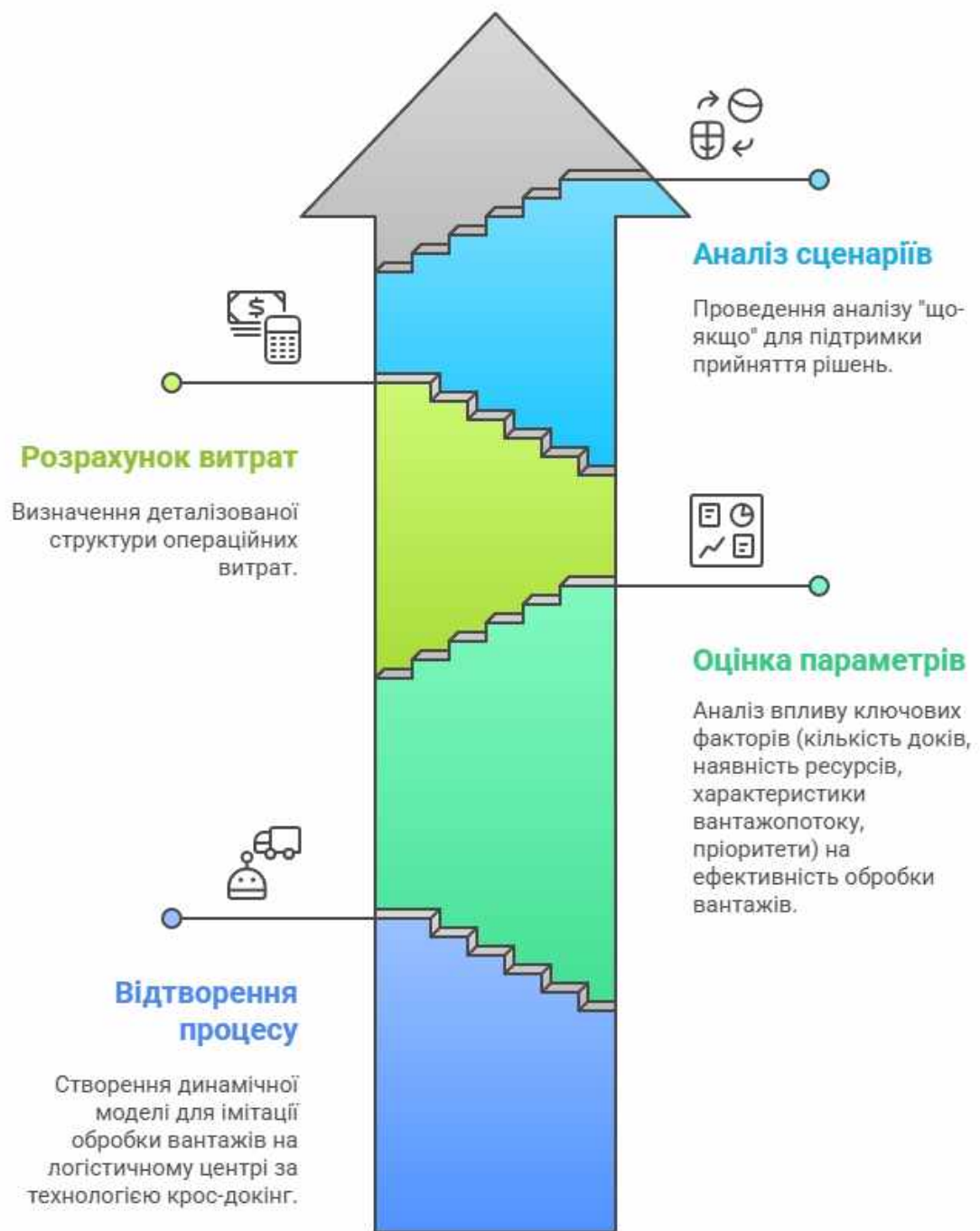


Рисунок 3.4 – Основні завдання програмного продукту «Симулятор Крос-Докінгу»

Функціонально програмний продукт складається з наступних основних блоків.

Блок введення вхідних даних та параметрів моделювання (рис 3.5) – цей блок реалізований на першій вкладці графічного інтерфейсу («Вхідні Дані та Керування») і слугує для конфігурації сценарію симуляції, користувач має змогу вручну задати такі параметри як кількість доступних доків для одночасного обслуговування автомобілів, загальну кількість доступних ресурсів (окремо робітників та одиниць техніки) та визначити нормативну потребу в цих ресурсах для обслуговування одного автомобіля на одному доці, встановити ставки витрат, що використовуються для розрахунку загальної вартості операцій. Інтерфейс дозволяє детально описати кожний автомобіль, для кожного автомобіля вказуються: унікальний ID, тип (вхідний/вихідний), точний час прибуття до логістичного центру, пріоритет обслуговування (числовий ранг), прямі витрати (наприклад, на матеріали чи інші специфічні витрати для даного авто). Для вихідних автомобілів додатково вказуються технологічні залежності (список ID вхідних авто, які мають бути оброблені першими) та бажаний дедлайн відправлення.

Рисунок 3.5 – Інтерфейс розробленого програмного забезпечення
«Симулятор Крос-Докінгу» (вкладка введення даних)

Блок імітаційного моделювання він виконує безпосередню симуляцію процесу обробки автомобілів на основі введених даних. Симуляція просувається в часі від події до події (прибуття автомобіля, завершення обслуговування). При звільненні доку або ресурсів система перевіряє черги очікування. Відповідно до заданих пріоритетів та наявності ресурсів (порівняння доступних ресурсів з потребою на док), автомобіль з найвищим пріоритетом призначається на обслуговування. Для вихідних автомобілів перевіряється виконання умов залежності (чи були оброблені всі необхідні вхідні автомобілі) перед тим, як вони зможуть обслуговуватися. Під час симуляції розраховуються загальні витрати на обробку вантажу на логістичному центрі та загальний час обробки, також генерується детальний текстовий лог ключових подій симуляції для можливості покрокового аналізу процесу (рис3.6).

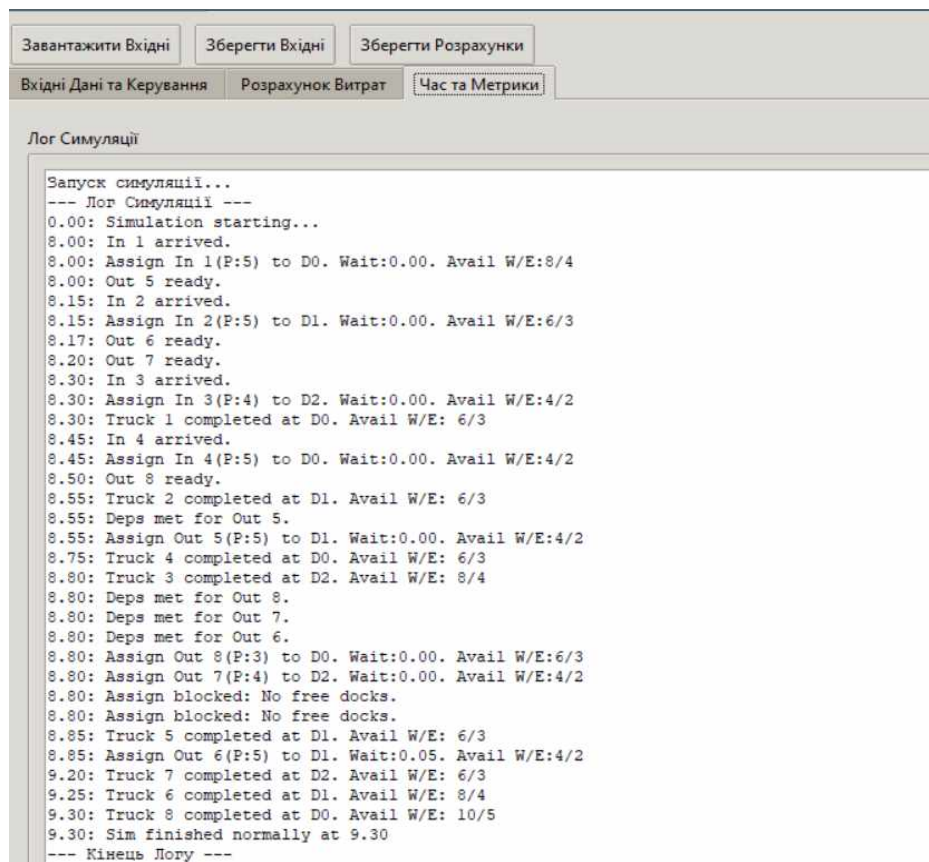


Рисунок 3.6 – Інтерфейс розробленого програмного забезпечення
«Симулятор Крос-Докінгу» (вкладка час та метрики)

Блок розрахунку та відображення результатів, після завершення імітаційного прогону цей блок обробляє зібрані дані та представляє їх користувачеві. На основі накопичених даних розраховуються підсумкові значення: загальний час симуляції, загальні витрати за кожною категорією та сумарні, середні показники часу (очікування, перебування в системі), загальна кількість оброблених/необслужених/запізнених автомобілів, пікове навантаження на ресурси. Розраховані значення виводяться у структурованому вигляді на вкладках «Розрахунок Витрат» (рис 3.7) та «Час та Метрики» (рис 3.8). Функціонал дозволяє зберегти зведені результати та повний лог симуляції у текстовий файл для документування та подальшого використання у дослідженні.

Розраховані Витрати:	
Витрати очікування ВХІД авто (грн):	0.00 ₴
Витрати очікування ВИХІД авто (грн):	2.50 ₴
Витрати на персонал (грн):	620.00 ₴
Витрати на техніку (грн):	186.00 ₴
Витрати на використання доків (грн):	9300.00 ₴
Витрати на обсл. авто (мат.) (грн):	905.00 ₴
Інші витрати на авто (грн):	31.00 ₴
Штрафи за запізнення (грн):	0.00 ₴
ЗАГАЛЬНІ ВИТРАТИ (грн):	11044.50 ₴

Рисунок 3.7 – Інтерфейс розробленого програмного забезпечення
«Симулятор Крос-Докінгу» (вкладка розрахунок витрат)

Завантажити Вхідні Зберегти Вхідні Зберегти Розрахунки

Вхідні Дані та Керування Розрахунок Витрат **Час та Метрики**

Час та Метрики Ефективності:

Час симуляції (год):	9.30
Обслужено автомобілів:	8
Середній час очікування авто (год):	0.01
Середній час авто в системі (год):	0.65
Запізнення (кількість):	0
Пікове використання робітників:	6
Пікове використання техніки:	3
Не обслужено ВХІД авто:	0
Не обслужено ВИХІД авто:	0
ID не обсл. ВХІД авто:	-
ID не обсл. ВИХІД авто:	-

Рисунок 3.8 – Інтерфейс розробленого програмного забезпечення
«Симулятор Крос-Докінгу» (розрахунок часу обслуговування)

3.3 Розробка автоматизованої системи побудови та оптимізації спільних операційних графіків

Стабільна та ритмічна робота логістичного центру, забезпечена розробкою ефективних операційних графіків спільної роботи, позитивно впливає на весь ланцюг поставок. Учасники міжнародних перевезень отримують більш точну інформацію про терміни проходження вантажу через ЛЦ, що дозволяє їм краще планувати свою діяльність, оптимізувати власні ресурси та виконувати зобов'язання перед кінцевими споживачами [143]. Це підвищує загальний рівень сервісу та довіри в ланцюгу поставок.

Виходячи з проведеного аналізу сучасних викликів в управлінні крос-докінговими операціями на логістичних центрах (ЛЦ), критичної ролі узгодженого операційного графіку у підвищенні їх ефективності та виявлених обмежень існуючих інформаційних систем, обґрунтовується

необхідність розробки спеціалізованої інформаційної технології (ІТ) [144]. Дана ІТ має стати інструментом для автоматизації та оптимізації процесів планування, координації та моніторингу спільної роботи транспортних засобів та НРП в умовах крос-докінгу при міжнародних автомобільних перевезеннях вантажів (лістинг програми представлено в додатку Д).

Мета розробки інформаційної технології – підвищення ефективності виконання міжнародних перевезень вантажів шляхом вдосконалення процесів управління крос-докінговими операціями на логістичних центрах за рахунок автоматизованої побудови, оптимізації та підтримки виконання спільних операційних графіків роботи транспортних засобів (автомобілів, що доставляють дрібні партії вантажу та магістральних автомобілів, що виконують доставку на магістральних лініях) і НРП.

Для досягнення поставленої мети, розроблювана ІТ повинна забезпечувати вирішення наступних ключових завдань:

- збір, інтеграція та обробка вхідних даних: автоматизований або напівавтоматизований збір та систематизація інформації про плановані прибуття автомобілів-доставників (час, обсяг та характеристики вантажу, маршрут), заплановані відправлення магістральних автомобілів, а також про доступність та характеристики ресурсів ЛЦ (кількість та продуктивність НРП, графіки роботи персоналу);

- автоматизоване формування спільних операційних графіків: розробка та реалізація алгоритмів для побудови узгоджених у часі розкладів виконання операцій з розвантаження дрібних партій, їх консолідації (за потреби) та завантаження в магістральні автомобілі з урахуванням обмежень на ресурси ЛЦ;

- оптимізація графіків за заданими критеріями: забезпечення можливості оптимізації розрахованих графіків за одним або декількома критеріями, такими як мінімізація сумарного часу простою транспортних засобів та НРП, мінімізація загального часу обробки вантажу на ЛЦ, максимізація пропускної здатності ЛЦ, рівномірність завантаження НРП;

- візуалізація та підтримка прийняття рішень: надання користувачеві (диспетчеру ЛЦ) інструментів для наочного представлення розрахованих графіків (наприклад, у вигляді діаграм Ганта, матричних розкладів), а також можливостей для їх інтерактивного коригування у разі виникнення непередбачених ситуацій або зміни оперативних умов;
- моніторинг виконання графіків: забезпечення функціоналу для відстеження фактичного виконання запланованих операцій, виявлення відхилень від графіка та інформування відповідальних осіб;
- аналіз ефективності та формування звітності: розрахунок ключових показників ефективності крос-докінгових операцій на основі планових та фактичних даних, генерація аналітичних звітів для оцінки якості планування та виявлення резервів для подальшого вдосконалення.

Розроблювана ІТ має функціонувати як система підтримки прийняття рішень для диспетчерського персоналу логістичного центру. Вона може інтегруватися з існуючими системами управління транспортом (TMS) та системами управління складом (WMS) для обміну необхідними даними, або функціонувати як самостійний модуль. Контекстну діаграму ІТ представлено на рисунку 3.9.

Для забезпечення функціонування запропонованого цифрового рішення необхідні певні вхідні дані, на основі яких будуть генеруватися вихідні результати, що представлені в таблиці 3.1.

Функціональні вимоги до інформаційної технології – це, по суті, опис того, що саме система повинна робити, які функції вона має виконувати та які завдання вирішувати для користувача. Вони визначають специфічну поведінку системи та її взаємодію з користувачами або іншими системами.

Функціональні вимоги запропонованого цифрового рішення наведені в таблиці 3.2.

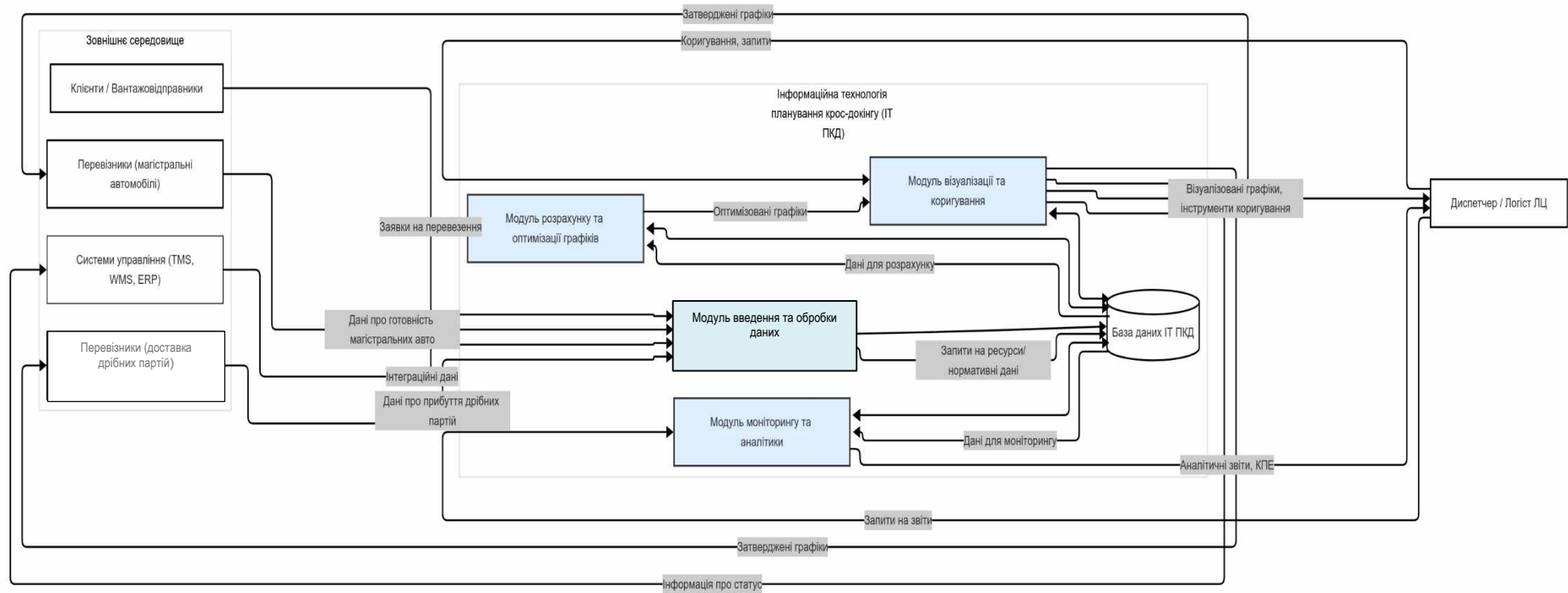


Рисунок 3.9 – Контекстна діаграма запропонованого цифрового рішення

Таблиця 3.1 – Основні вхідні дані та вихідні результати запропонованого цифрового рішення

Категорія	Вхідні дані	Вихідні результати (продукти ІТ)
Дані про ЛЦ	Кількість НРП, їх типи та пропускна здатність; графік роботи ЛЦ; наявність зон тимчасової консолідації; нормативи часу на виконання операцій	Оптимальний/раціональний спільний операційний графік роботи НРП
Дані про ТЗ	Кількість автомобілів, що доставляють вантаж дрібними партіями та магістральних автомобілів; їх типи, вантажопідйомність, графіки доступності	Індивідуальні розклади для кожного автомобіля, що доставляють вантаж дрібними партіями (час прибуття на НРП, час відправлення). Індивідуальні розклади для магістральних автомобілів (час подачі на НРП, час відправлення)
Дані про вантажі	Заявки на доставку дрібних партій (очікуваний час прибуття, обсяг, вага, тип вантажу, пункт призначення). Плани на відправлення консолідованих вантажів	Узгоджений план перевантажувальних операцій. Інформація про очікуваний час завершення консолідації для кожного магістрального рейсу
Оперативні дані	Фактичний час прибуття/відправлення ТЗ; фактичний час виконання операцій; інформація про збої та нештатні ситуації	Звіти про виконання графіків, аналіз відхилень. Розраховані показники ефективності (час простою ТЗ та НРП, коефіцієнт використання НРП, середній час обробки вантажу)
Налаштування розробника	Критерії оптимізації графіків та їх пріоритети; параметри для алгоритмів планування	Варіанти графіків, згенеровані за різними критеріями. Рекомендації щодо коригування планів

Таблиця 3.2 – Ключові функціональні вимоги до запропонованого цифрового рішення

Функціональна вимога	Опис
Управління нормативно-довідковою інформацією	Можливість введення, зберігання та редагування даних про ресурси ЛЦ (НРП, персонал), типи транспортних засобів, нормативи часу на виконання операцій, параметри маршрутів
Реєстрація та обробка оперативних даних	Введення та обробка інформації про плановані та фактичні прибуття/відправлення вантажів та транспортних засобів. Можливість імпорту даних з зовнішніх систем
Автоматизована побудова графіків	Генерація початкового варіанту спільного операційного графіка на основі вхідних даних та закладених правил (наприклад, FIFO для черг, пріоритезація певних рейсів)
Оптимізація графіків	Застосування алгоритмів оптимізації для покращення початкового графіка за обраними критеріями (мінімізація простоїв, часу обробки тощо)
Візуалізація розкладів	Графічне представлення розрахованих графіків у вигляді діаграм Ганта для ресурсів (НРП, автомобілі) та/або матричних розкладів, що відображають завантаження НРП у часі
Інтерактивне коригування графіків	Можливість для диспетчера вносити зміни до розрахованого графіка вручну (наприклад, перепризначення НРП, зміна часу операції) з автоматичною перевіркою на конфлікти та перерахунком залежних операцій
Моніторинг виконання та сповіщення	Відстеження фактичного виконання операцій порівняно з планом. Система сповіщень про критичні відхилення, затримки, можливі проблеми
Аналітика та звітність	Розрахунок та відображення ключових показників ефективності (час простою, коефіцієнт використання ресурсів, своєчасність відправлень). Формування стандартних та спеціальних звітів

Впровадження запропонованого цифрового рішення дозволить досягти низки позитивних ефектів, що сприятимуть підвищенню загальної ефективності міжнародних перевезень через логістичні центри (табл. 3.3).

Таблиця 3.3 – Очікувані ефекти від впровадження запропонованого цифрового рішення

Категорія ефекту	Опис очікуваного ефекту	Потенційний вимірювач
Економічні ефекти	Зниження операційних витрат за рахунок скорочення простоїв ТЗ та НРП, економії палива, оптимального використання персоналу. Зменшення втрат від псування вантажів через прискорення обробки. Зменшення штрафів за зриви графіків	Собівартість обробки 1 т вантажу (грн/т); рівень простоїв транспорту (год); витрати НРП (грн); питомі операційні витрати (грн/од.).
Операційні ефекти	Підвищення пропускної здатності ЛЦ. Скорочення загального часу обробки вантажів (циклу крос-докінгу). Підвищення коефіцієнта використання НРП та транспортних засобів. Зменшення кількості помилок при сортуванні та комплектації	Пропускна здатність ЛЦ (т/добу); тривалість циклу обробки вантажу (год); скорочення середнього часу перебування вантажу на ЛЦ, год.
Якісні ефекти	Підвищення рівня сервісу для клієнтів за рахунок своєчасності та надійності доставки. Підвищення прозорості та прогнозованості логістичних операцій. Покращення умов праці диспетчерського персоналу	Індекс задоволеності клієнтів; зменшення кількості скарг, од.; зменшення часу на прийняття управлінських рішень диспетчером, год.
Стратегічні ефекти	Підвищення конкурентоспроможності логістичного центру та транспортних компаній. Зміцнення позицій на ринку міжнародних перевезень. Можливість обробки більших та складніших вантажопотоків.	Частка ринку, %; кількість нових клієнтів, од.; розширення географії перевезень

Таким чином, постановка задачі розробки запропонованого цифрового рішення чітко визначає її мету, завдання, функціональні та нефункціональні вимоги, а також очікувані результати. Створення такої ІТ є обґрунтованим та необхідним кроком для вирішення актуальних проблем управління крос-докінговими операціями на логістичних центрах, що обслуговують міжнародні автомобільні перевезення, та сприятиме підвищенню їх загальної ефективності.

В результаті досліджень розроблене запропоноване цифрове рішення в якості прикладної програми, яка є інструментом для моделювання, складання та аналізу ефективності графіків (розкладів) спільної роботи учасників транспортного процесу в умовах крос-докінгу на логістичному центрі. Програма призначена для підвищення ефективності міжнародних перевезень вантажів шляхом оптимізації операцій з обробки дрібних партій вантажу, що надходять від постачальників, їх консолідації та подальшого завантаження на магістральні транспортні засоби.

Основна мета програми – автоматизована побудова раціональних розкладів для автомобілів, що доставляють дрібні партії вантажу, НРП та магістральних відправлень. Мінімізація непродуктивних простоїв усіх залучених ресурсів (автомобілів, НРП, консолідованих вантажів). Розрахунок ключових показників ефективності, включаючи часові та вартісні оцінки простоїв. Надання користувачеві (диспетчеру, логісту) інструментів для аналізу та прийняття обґрунтованих управлінських рішень щодо організації крос-докінгових операцій.

Програма реалізує наступний набір функціональних можливостей:

1. Введення та керування вхідними даними - інтерактивний графічний інтерфейс користувача (GUI) для введення параметрів логістичної системи (рис 3.10):

- кількість автомобілів, що доставляють дрібні партії вантажу;
- кількість НРП на ЛЦ;
- час початку робочої зміни ЛЦ (у форматі ГОД:ХХ);
- загальний горизонт планування (тривалість робочої зміни у хвилинах);
- нормативний час на завантаження однієї сформованої магістральної партії (20 тонн) у хвилинах;
- вартість однієї хвилини простою для автомобілів, що доставляють дрібні партії вантажу (грн/хв);

Вхідні дані

Кількість авто-доставників:	12
Кількість НРП (постів):	5
Початок роботи (ГГ:ХХ):	08:00
Горизонт план., хв:	480
Час завант. магістрал. партії (20т), хв:	60
Вартість простою доставника (грн/хв):	3
Вартість простою магістрал. вантажу (грн/хв):	5
Вартість простою НРП (грн/хв):	0.5
К-ть маршрутів доставників:	10

Дані по маршрутах доставників

№ Маршруту	Час оборту, хв	Сер. вантаж, т	К-ть їздок	ID Магістрала (0-загал)
1	60	2.5	12	1
2	80	3.0	18	1
3	45	4.0	23	2
4	90	1.5	7	2
5	110	1.0	14	2

Розрахувати та Оптимізувати

Новий розрахунок

Експорт розкладів в Excel

Зберегти діаграму Ганта

Рисунок 3.10 – Інтерфейс запропонованого цифрового рішення для вводу вхідних даних

- вартість однієї хвилини простою готового до відправлення магістрального вантажу (в очікуванні НРП, грн/хв);
 - вартість однієї хвилини простою одного НРП (грн/хв).
2. Динамічна таблиця для введення детальних даних по кожному маршруту автомобілів, що доставляють дрібні партії вантажу:
- час оборту автомобіля за маршрутом (хв);
 - середня вага вантажу, що доставляється за одну їзду (т);
 - запланована кількість їздок (рейсів) за маршрутом;

– ідентифікатор магістрального відправлення (ID Магістрала), для якого призначений вантаж з даного маршруту (значення «0» використовується для загального/першого доступного магістрального відправлення).

Розклади будуються із застосуванням алгоритму на основі дискретно-подійної симуляції для моделювання послідовності подій на ЛЦ (прибуття автомобілів, звільнення НРП, завершення операцій розвантаження/завантаження, готовність магістральних партій) (рис.3.11).

Вхідні дані

Кількість авто-доставників:

12

Кількість НРП (постів):

5

Початок роботи (ГГ:ХХ):

08:00

Горизонт план., хв:

480

Час завант. магістрал. партії (20т), хв:

60

Вартість простою доставника (грн/хв):

3

Вартість простою магістрал. вантажу (грн/хв):

5

Вартість простою НРП (грн/хв):

0.5

К-ть маршрутів доставників:

10

Дані по маршрутах доставників

№ Маршруту	Час оборту, хв	Сер. вантаж, т	К-ть іздок	ID Магістрала (0-загал)
1	60	2.5	12	1
2	80	3.0	18	1
3	45	4.0	23	2
4	90	1.5	7	2
5	110	1.0	14	2

Розрахувати та Оптимізувати

Новий розрахунок

Експорт розкладів в Excel

Зберегти діаграму Ганта

Розклад Доставників

Розклад Маг

Авто-Доставник Д1:

- 08:45 - 09:03: Розв. на НРП1

- 10:00 - 10:14: Розв. на НРП3

- 11:00 - 11:18: Розв. на НРП1

- 13:20 - 13:36: Розв. на НРП5

Авто-Доставник Д10:

- 09:30 - 09:48: Розв. на НРП5

- 11:00 - 11:14: Розв. на НРП5

- 14:00 - 14:18: Розв. на НРП5

Авто-Доставник Д11:

- 09:50 - 10:02: Розв. на НРП2

- 13:15 - 13:33: Розв. на НРП3

- 15:30 - 15:48: Розв. на НРП3

Авто-Доставник Д12:

- 10:00 - 10:14: Розв. на НРП1

- 12:30 - 12:44: Розв. на НРП5

Авто-Доставник Д2:

- 09:00 - 09:16: Розв. на НРП2

- 10:00 - 10:14: Розв. на НРП4

- 11:40 - 11:52: Розв. на НРП5

- 15:20 - 15:32: Розв. на НРП5

Авто-Доставник Д3:

- 09:00 - 09:14: Розв. на НРП3

- 10:00 - 10:16: Розв. на НРП5

- 11:45 - 12:03: Розв. на НРП2

- 14:00 - 14:16: Розв. на НРП3

Авто-Доставник Д4:

- 09:00 - 09:14: Розв. на НРП4

- 10:03 - 10:17: Розв. на НРП2

- 12:30 - 12:48: Розв. на НРП2

- 14:45 - 15:03: Розв. на НРП3

Авто-Доставник Д5:

- 09:00 - 09:14: Розв. на НРП5

- 10:14 - 10:28: Розв. на НРП1

- 13:00 - 13:16: Розв. на НРП1

- 15:30 - 15:44: Розв. на НРП1

Авто-Доставник Д6:

- 09:03 - 09:17: Розв. на НРП1

- 10:15 - 10:33: Розв. на НРП1

Рисунок 3.11 – Розклад роботи автомобілів, що доставляють дрібні партії вантажу

Динамічне призначення завдань на розвантаження дрібних партій виконується на доступні НРП та вільні автомобілі, що доставляють дрібні

партії вантажу. Відстеження накопичення ваги вантажів для кожного унікального ID магістрального відправлення виконується за рахунок формування завдань на завантаження магістральних партій (фіксована вантажність 20 тонн) при досягненні необхідної накопиченої ваги або при завершенні всіх запланованих дрібних рейсів для даного ID магістрала (якщо залишився вантаж). На наступному етапі виконується призначення завдань на завантаження магістральних партій на доступні НРП.

Алгоритм спрямований на мінімізацію простоїв шляхом ефективного використання ресурсів за принципом «перший прибув – перший обслужений» (FIFO) для черг та вибору найраніше доступних ресурсів.

Для кожного учасника транспортного процесу формуються детальні текстові розклади (рис.3.12).

Вхідні дані

Кількість авто-доставників:

12

Кількість НРП (постів):

5

Початок роботи (ГГ:ХХ):

08:00

Горизонт план., хв:

480

Час завант. магістрал. партії (20т), хв:

60

Вартість простою доставника (грн/хв):

3

Вартість простою магістрал. вантажу (грн/хв):

5

Вартість простою НРП (грн/хв):

0.5

К-ть маршрутів доставників:

10

Дані по маршрутах доставників

№ Маршруту	Час оборту, хв	Сер. вантаж, т	К-ть їздок	ID Магістрала (0-загал)
1	60	2.5	12	1
2	80	3.0	18	1
3	45	4.0	23	2
4	90	1.5	7	2
5	110	1.0	14	2

Розрахувати та Оптимізувати

Новий розрахунок

Експорт розкладів в Excel

Зберегти діаграму Ганта

Розклад Доставників

Розклад Магістральних Відправлень

Магістральне Відправлення Маг.1_П1:

- 13:16 - 14:16: Зав. на НРП4

Магістральне Відправлення Маг.2_П1:

- 11:18 - 12:18: Зав. на НРП4

Магістральне Відправлення Маг.2_П2:

- 14:18 - 15:18: Зав. на НРП2

Магістральне Відправлення Маг.Загальний_П1:

- 10:28 - 11:28: Зав. на НРП3

Рисунок 3.12 – Розклад роботи автомобілів для магістральних відправлень

Розклад для автомобілів, що доставляють дрібні партії вантажу: час прибуття на ЛЦ, час постановки на НРП, час початку та завершення розвантаження, номер НРП, час відправлення з ЛЦ (початок наступного оборту або завершення роботи). Розклад для магістральних відправлень: ідентифікатор магістрального відправлення, час готовності консолідованої партії, час постановки на НРП, час початку та завершення завантаження, номер НРП.

Розклад для НРП представляє собою послідовність операцій (розвантаження дрібної партії з зазначенням автомобіля, що доставляє дрібні партії вантажу, та маршруту/рейсу; завантаження магістральної партії), час початку та завершення кожної операції (рис.3.13).

Вхідні дані

Кількість авто-доставників: 12

Кількість НРП (постів): 5

Початок роботи (ГГ:ХХ): 08:00

Горизонт план., хв: 480

Час завант. магістрал. партії (20т), хв: 60

Вартість простою доставника (грн/хв): 3

Вартість простою магістрал. вантажу (грн/хв): 5

Вартість простою НРП (грн/хв): 0.5

К-ть маршрутів доставників: 10

Дані по маршрутах доставників

№ Маршруту	Час оборту, хв	Сер. вантаж, т	К-ть їздок	ID Магістрала (0-загал)
1	60	2.5	12	1
2	80	3.0	18	1
3	45	4.0	23	2
4	90	1.5	7	2
5	110	1.0	14	2

Розрахувати та Оптимізувати

Новий розрахунок

Експорт розкладів в Excel

Зберегти діаграму Ганта

Розклад Доставників **Розклад Магістральних Відправлень** **Розклад НРП**

НРП (Пост) 1:

- 08:45 - 09:03: Розв.Д1 (М3-П1)
- 09:03 - 09:17: Розв.Д6 (М9-П1)
- 10:00 - 10:14: Розв.Д12 (М6-П2)
- 10:14 - 10:28: Розв.Д5 (М10-П2)
- 10:15 - 10:33: Розв.Д6 (М3-П3)
- 11:00 - 11:18: Розв.Д1 (М3-П4)
- 12:00 - 12:16: Розв.Д6 (М2-П3)
- 13:00 - 13:16: Розв.Д5 (М1-П5)
- 14:00 - 14:14: Розв.Д8 (М4-П4)
- 14:40 - 14:56: Розв.Д9 (М2-П5)
- 15:30 - 15:44: Розв.Д5 (М4-П5)

НРП (Пост) 2:

- 09:00 - 09:16: Розв.Д2 (М1-П1)
- 09:50 - 10:02: Розв.Д11 (М5-П1)
- 10:03 - 10:17: Розв.Д4 (М9-П2)
- 11:00 - 11:16: Розв.Д8 (М1-П3)
- 11:45 - 12:03: Розв.Д3 (М3-П5)
- 12:30 - 12:48: Розв.Д4 (М3-П6)
- 13:30 - 13:42: Розв.Д7 (М5-П3)
- 14:18 - 15:18: Зав.Маг (Маг.2_П2)

НРП (Пост) 3:

- 09:00 - 09:14: Розв.Д3 (М6-П1)
- 09:14 - 09:28: Розв.Д7 (М10-П1)
- 09:20 - 09:36: Розв.Д8 (М2-П1)
- 10:00 - 10:14: Розв.Д1 (М7-П2)
- 10:28 - 11:28: Зав.Маг (Маг.Загальний_П1)
- 12:00 - 12:16: Розв.Д9 (М1-П4)
- 13:15 - 13:33: Розв.Д11 (М3-П7)
- 14:00 - 14:16: Розв.Д3 (М1-П6)
- 14:45 - 15:03: Розв.Д4 (М3-П9)
- 15:30 - 15:48: Розв.Д11 (М3-П10)

НРП (Пост) 4:

- 09:00 - 09:14: Розв.Д4 (М7-П1)
- 09:30 - 09:44: Розв.Д9 (М4-П1)
- 10:00 - 10:14: Розв.Д2 (М8-П2)
- 10:40 - 10:56: Розв.Д7 (М2-П2)
- 11:18 - 12:18: Зав.Маг (Маг.2_П1)
- 13:16 - 14:16: Зав.Маг (Маг.1_П1)
- 15:00 - 15:16: Розв.Д6 (М1-П7)

НРП (Пост) 5:

- 09:00 - 09:14: Розв.Д5 (М6-П1)
- 09:30 - 09:44: Розв.Д10 (М3-П2)

Рисунок 3.13 – Розклад роботи для кожного НРП

Візуалізація загального графіка спільної роботи представлена у вигляді діаграми Ганта (загальний вигляд представлено на рисунку 3.14), де

відображаються періоди зайнятості та непродуктивного простою для кожного НРП, автомобілів що доставляють дрібні партії вантажу та сформованого магістрального відправлення (деталізований вигляд представлено на рисунку 3.15).

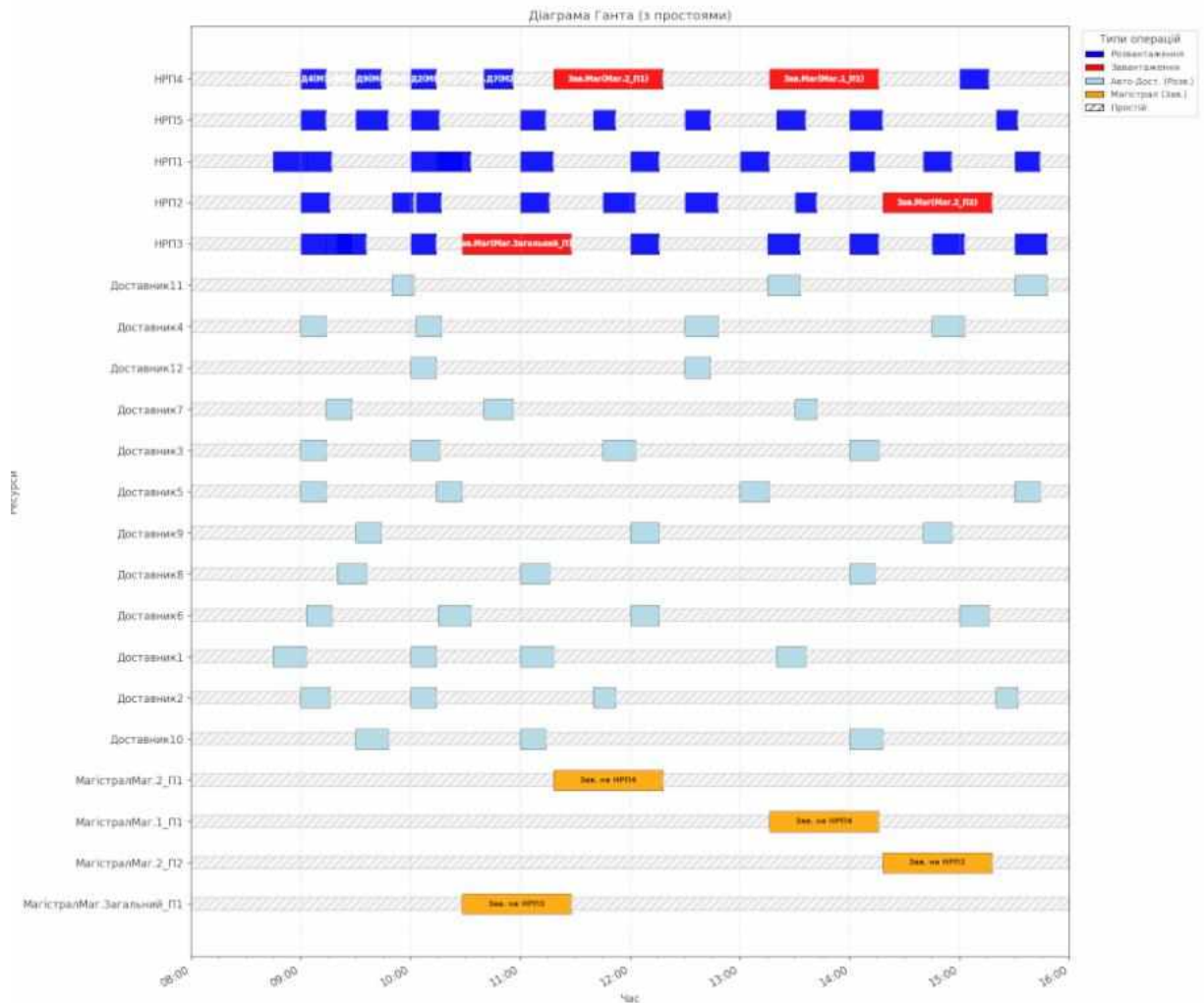


Рисунок 3.14 – Діаграма Ганта (загальний вигляд)

За побудованими розкладами учасників транспортного процесу проводиться розрахунок та відображення показників ефективності: розрахунок сумарного часу невиробничих простоїв (хв) для – автомобілів, що доставляють дрібні партії вантажу (в очікуванні НРП), для транспортних засобів для доставки магістральних вантажів (в очікуванні НРП для завантаження), НРП (в очікуванні автомобілів/завдань), та виконується

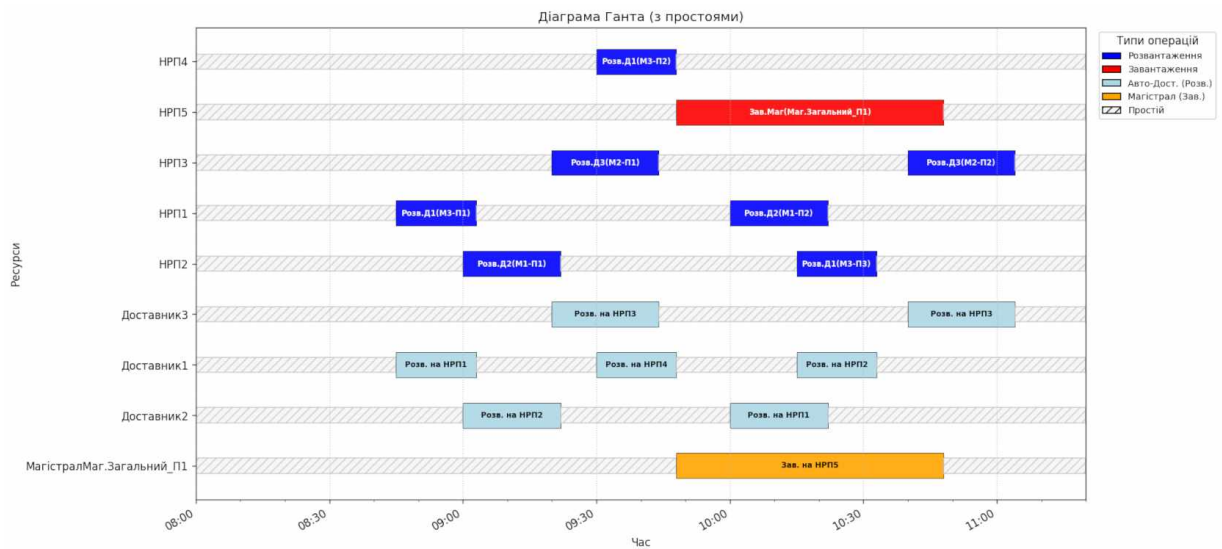


Рисунок 3.15 – Діаграма Ганта (деталізований вигляд)

розрахунок загального сумарного часу простою всіх ресурсів і відповідний розрахунок вартості простоїв (грн) для кожної категорії ресурсів та загальної вартості простоїв на основі введених тарифів. Відображення розрахованих показників представлено у спеціальній вкладці інтерфейсу (рис.3.16).

Вхідні дані

Кількість авто-доставників: 12

Кількість НРП (постів): 5

Початок роботи (ГГ:ХХ): 08:00

Горизонт план., хв: 480

Час завант. магістрал парії (20т), хв: 60

Вартість простою доставника (грн/хв): 3

Вартість простою магістрал. вантажу (грн/хв): 5

Вартість простою НРП (грн/хв): 0.5

К-ть маршрутів доставників: 10

Дані по маршрутах доставників

№ Маршруту	Час обороту, хв	Сер. вантаж, т	К-ть їздок	ID Магістрала (0-загал)
1	60	2.5	12	1
2	80	3.0	18	1
3	45	4.0	23	2
4	90	1.5	7	2
5	110	1.0	14	2

Розрахувати та Оптимізувати

Новий розрахунок

Експорт розкладів в Ексел

Зберегти діаграму Ганта

Розклад Доставників Розклад Магістральних Відправлень Розклад НРП Діаграма Ганта Показники ефективності

--- ЧАС ПРОСТОЮ ---
 Авто-Доставників: 6273 хв
 Магістральних Вантажів (очікування НРП): 0 хв
 НРП (Постів): 3143 хв
 ЗАГАЛЬНИЙ ЧАС ПРОСТОЮ: 9416 хв

--- ВАРТІСТЬ ПРОСТОЮ ---
 Авто-Доставників: 18819.00 грн
 Магістральних Вантажів: 0.00 грн
 НРП (Постів): 1571.50 грн
 ЗАГАЛЬНА ВАРТІСТЬ ПРОСТОЮ: 20390.50 грн

Рисунок 3.16 – Розрахунок та відображення показників ефективності

В розробленому програмному продукті реалізовано експорт результатів - можливість збереження згенерованої діаграми Ганта у графічний файл (*.png), можливість експорту детальних текстових розкладів та розрахованих показників ефективності у файл формату Excel (.xlsx) для подальшого аналізу та звітності (рис.3.17).

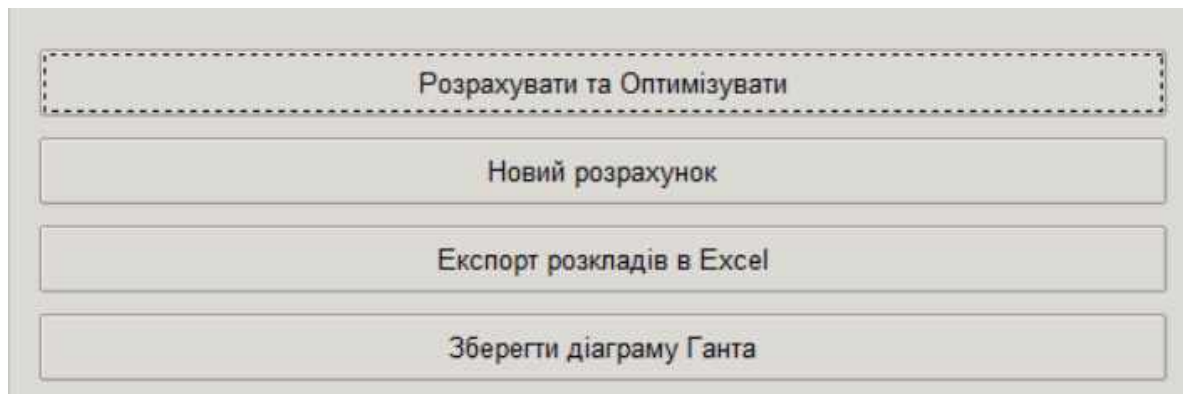


Рисунок 3.17 – Реалізація експорту результатів розрахунків

В основі роботи програми лежать наступні методи та алгоритми: дискретно-подійна симуляція [145], ядро планувальника [146]. Система моделюється як послідовність подій, що відбуваються в певні моменти часу. До основних типів подій належать:

- delivery_arrival: Прибуття автомобіля-доставника на ЛЦ.
- unload_complete: Завершення розвантаження дрібної партії.
- mainline_cargo_ready: Готовність консолідованої магістральної партії до завантаження.
- load_complete: Завершення завантаження магістральної партії.
- resource_free: Звільнення ресурсу (НПП, автомобіль-доставник).
- try_assign_unload/try_assign_mainline_load: Спроба призначити завдання з черги на вільний ресурс.

Черга подій управляється за допомогою пріоритетної черги, де пріоритет визначається часом настання події. Управління чергами, для автомобілів, що доставляють дрібні партії вантажу, що прибули та очікують

на вільний НРП, а також для готових магістральних партій, що очікують на завантаження, використовуються черги (реалізовані за допомогою `collections.deque` або обробляються в рамках логіки подій). Завдання з черги обробляються за принципом FIFO або на основі доступності ресурсів.

При виконанні розрахунків застосовуються евристичні правила призначення ресурсів – при виборі НРП для операції перевага надається тому, який звільняється раніше або вже вільний. При виборі автомобіля, що доставляють дрібні партії вантажу для виконання рейсу (після його повернення) також може використовуватися критерій найранішого звільнення. Накопичення та консолідація вантажу відбувається наступним чином - програма веде облік накопиченої ваги для кожного унікального ID магістрального відправлення. Рішення про готовність магістральної партії приймається при досягненні цільової вантажності (20 тонн) або після обробки всіх дрібних партій, призначених для цього магістрального напрямку.

3.4 Висновки по розділу 3

1. Розроблено та реалізовано імітаційну модель «LogisticsSim» для порівняльного аналізу ефективності чотирьох альтернативних транспортно-технологічних схем доставки вантажів у міжнародному сполученні. Підхід полягає у застосуванні методу глибокої декомпозиції логістичного циклу, що, на відміну від існуючих агрегованих підходів, дозволяє моделювати структуру витрат і часу з урахуванням специфічних транскордонних факторів та динамічних ризиків, зокрема, «військового ризику». Це забезпечує можливість багатокритеріальної оцінки сценаріїв «пряма доставка» проти «доставки через термінали» та підвищує точність прогнозування загальних витрат на доставку в умовах невизначеності.

2. Обґрунтовано та реалізовано застосування методу дискретно-подієвого моделювання для оптимізації роботи логістичних центрів із

використанням технології крос-докінгу. Створена програмна модель «Симулятор Крос-Докінгу» дозволяє відтворювати стохастичну динаміку вхідних і вихідних матеріальних потоків в умовах жорстких ресурсних обмежень (кількість доків, персоналу, техніки). Отримані результати дозволяють науково обґрунтувати необхідну конфігурацію ресурсів терміналу для мінімізації черг та вартості простоїв, доводячи, що ефективність системи залежить не від максимізації ресурсів, а від їх збалансованого розподілу та синхронізації процесів.

3. Розроблено автоматизовану систему побудови та оптимізації спільних операційних графіків, яка базується на алгоритмічній синхронізації процесів накопичення дрібних партій вантажів та їх консолідації у магістральні відправлення. Запропонований програмний інструментарій вирішує задачу мінімізації непродуктивних простоїв транспортних засобів шляхом переходу до планування на основі чітко визначених часових вікон. Візуалізація розкладів за допомогою діаграм Ганта дозволяє оперативно виявляти «вузькі місця» та коригувати графіки, забезпечуючи ритмічність міжнародних перевезень та зростання пропускної здатності терміналів.

РОЗДІЛ 4

ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ТА АПРОБАЦІЯ РОЗРОБЛЕНИХ МЕТОДІВ І МОДЕЛЕЙ

4.1 Експериментальні дослідження робастності спільних операційних графіків виконання робіт

Управління сучасними транспортно-логістичними системами базується на розробці спільних операційних графіків, що мають на меті узгодження роботи рухомого складу та НРП. Ці графіки, що ретельно планують час прибуття, маршрути, тривалість операцій та час обертів автомобілів, є детермінованими моделями. Вони являють собою ідеалізований план, побудований на основі нормативних або усереднених значень ключових параметрів. Однак, проблема полягає у розриві між цією детермінованою ідеалізацією та стохастичною, тобто випадковою та непередбачуваною, природою реального операційного середовища [147]. Вплив різноманітних факторів призводить до того, що фактичний час виконання окремих операцій та всього циклу доставки може значно відрізнятись від запланованого. Це, у свою чергу, спричиняє порушення ритмічності роботи та виникнення простоїв як транспортних засобів, так і НРП. Незначні відхилення на одному етапі можуть спровокувати «каскадний ефект» або «ефект доміно», коли збій в одній ланці транспортного процесу викликає ланцюгову реакцію порушень у всій системі, що призводить до значних економічних втрат.

Розроблені графіки спільної роботи є детермінованими моделями, що базуються на нормативних або усереднених значеннях параметрів (час обертів, тривалість навантажувально-розвантажувальних операцій, швидкісні режими). Проте реальна транспортна діяльність відбувається в умовах стохастичності, зумовленої дією численних непередбачуваних факторів. Це призводить до відхилень фактичних показників від розрахункових і потребує дослідження робастності графіків (рис. 4.1).

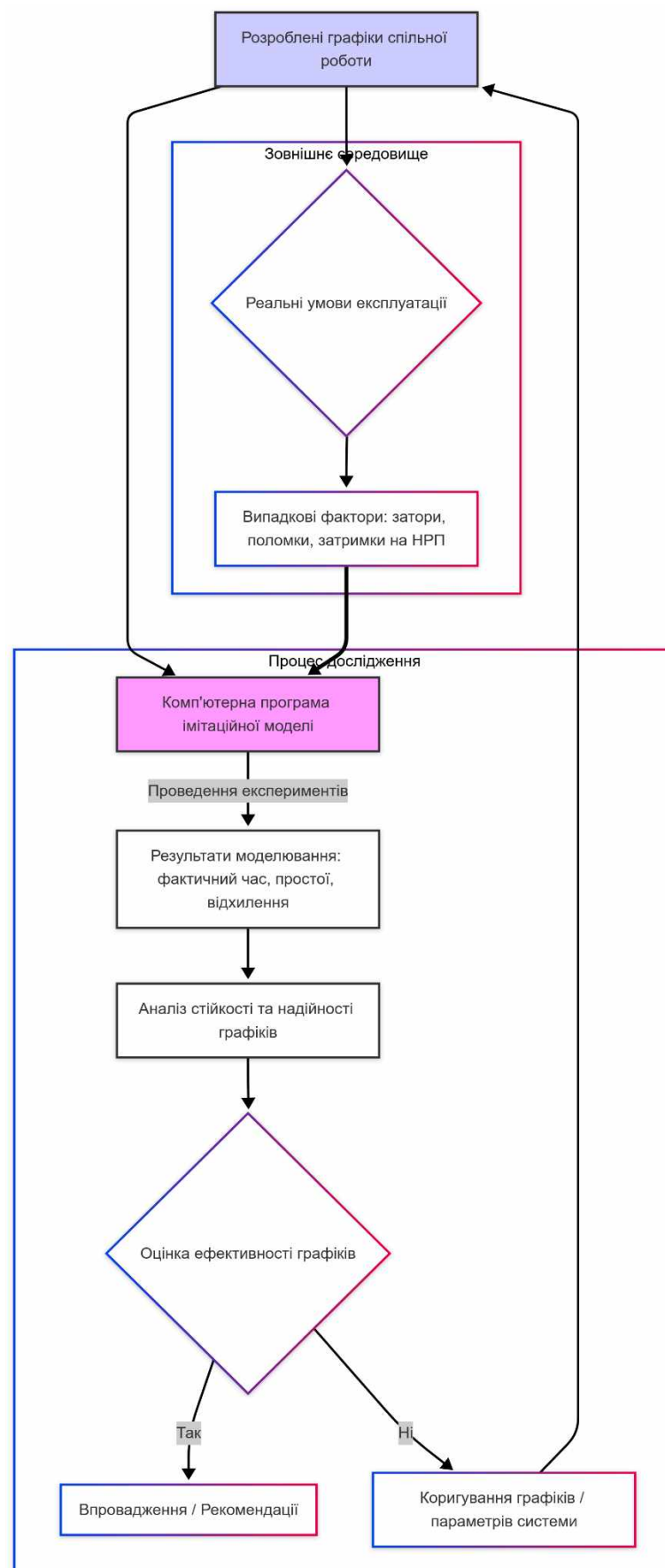


Рисунок 4.1 – Концептуальна схема процесу дослідження робастності графіків

Традиційний підхід до цієї проблеми часто є реактивним – створення ідеального графіка та подальше «управління збоями» шляхом коригування планів у реальному часі. Однак сучасна наука про управління операціями пропонує фундаментальну зміну парадигми: перехід від «управління збоями» до «проектування робастності». Цей підхід, відомий як робастна оптимізація, має на меті не пошук єдиного теоретично оптимального розв'язку, а розробку такого графіка, який залишається ефективним або принаймні допустимим за широкого спектра можливих несприятливих сценаріїв.

Використання теорії робастності є критично необхідним з огляду на специфіку об'єкта дослідження – міжнародних перевезень із застосуванням крос-докінгу. Крос-докінг передбачає жорстку синхронізацію – вантаж з вхідного авто має бути перевантажений у вихідне «точно в час». Без урахування робастності найменша затримка вхідного авто (наприклад, на кордоні) блокує вихідне авто, займає док і створює чергу. Детермінований графік у такій системі миттєво руйнується. Робастність дозволяє закласти науково обґрунтовані заплановані простой, щоб система поглинала ці збурення.

Міжнародні перевезення характеризуються високим рівнем невизначеності (час проходження митниці, черги, погодні умови на довгих маршрутах). Використання середніх значень (як у класичній логістиці) тут не працює, оскільки відхилення можуть сягати годин або днів. Поняття робастності дозволяє оперувати не середніми, а діапазонами ймовірностей. Традиційний менеджмент розглядає будь-який простій ресурсів як збиток. Теорія робастності в цій роботі математично доводить, що запланований простій (резерв) є інвестицією, яка зменшує загальні витрати шляхом запобігання дорогим аварійним збоям.

У цьому контексті змінюється і ставлення до самої невизначеності. Вона перестає бути виключно негативним фактором і перетворюється на цінний інформаційний актив. Систематичний збір та аналіз даних про відхилення – час руху за різними маршрутами в різний час доби, тривалість

обслуговування на НРП, частота поломок – дозволяє перейти від суб'єктивних припущень до кількісного моделювання ризиків. Побудова емпіричних імовірнісних розподілів для ключових стохастичних параметрів дає змогу оцінити не тільки середні значення, а й варіативність, а також ймовірність екстремальних подій. Таким чином, дані про минулі збої стають ключовим інструментом для побудови робастних планів на майбутнє, що є основою для проактивного, а не реактивного управління логістичними процесами.

Функціонування НРП також є джерелом значної невизначеності. На НРП можуть виникати черги з автомобілів, особливо при нерівномірному їх прибутті або обмеженій пропускній здатності пункту. Можливі також збої в роботі навантажувально-розвантажувального обладнання, що призводить до збільшення часу обробки одного автомобіля. Не менш важливим є аспект доступності та оперативності персоналу НРП, відсутність якого або недостатня кваліфікація може спричинити затримки.

Також не можна ігнорувати людський фактор. Помилки диспетчерського персоналу при плануванні та координації, запізнення водіїв, неоптимальний вибір маршруту водієм в об'їзд непередбачених перешкод, або навіть просто різний стиль водіння – все це вносить елемент випадковості у виконання транспортних операцій. Суб'єктивні рішення та дії людей на всіх етапах транспортного процесу можуть як компенсувати деякі негативні впливи, так і посилювати їх.

Для об'єктивної оцінки здатності детермінованих графіків функціонувати в стохастичному середовищі необхідно використовувати чіткі та вимірювані критерії. Ключовою характеристикою, що визначає практичну цінність будь-якого розкладу, є його робастність.

Робастність графіка характеризує його здатність зберігати прийнятні експлуатаційні показники під впливом випадкових збурень. Іншими словами, робастний графік не повинен «розвалюватися» від незначних відхилень.

Кількісно робастність оцінюють за допомогою низки показників, отриманих за результатами імітаційного моделювання. Для основного показника ефективності – зальних витрат від невиробничих простоїв транспортних засобів та НРМ $B_{заг}^{н.прост}$, його стабільність характеризується розкидом фактичних значень $B_{заг\,факт_i}^{н.прост}$ (де i – номер імітаційного прогону) відносно запланованого $B_{заг\,план}^{н.прост}$ або середнього фактичного значення $\bar{B}_{заг\,факт}^{н.прост}$ [148].

Одним з показників є коефіцієнт варіації $K_{вар}$, який показує відносну міру розсіювання значень показника навколо середнього

$$K_{вар} = \frac{\sigma_{B_{заг}^{н.прост}}}{\bar{B}_{заг\,факт}^{н.прост}} \quad (4.1)$$

де $\sigma_{B_{заг}^{н.прост}}$ – стандартне відхилення показника $B_{заг}^{н.прост}$ за результатами N імітаційних прогонів, грн.

Чим менше значення $K_{вар}$, тим стабільніший графік за цим показником.

Іншим показником є середнє абсолютне відхилення $\bar{\sigma}_{абс}$ або середнє квадратичне відхилення $\bar{\sigma}_{абс}^{кв}$ фактичних значень від запланованих:

$$\bar{\sigma}_{абс} = \frac{1}{N} \cdot \sum_{i=1}^n |B_{заг\,факт_i}^{н.прост} - B_{заг\,план}^{н.прост}|, \quad (4.2)$$

$$\bar{\sigma}_{абс}^{кв} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (B_{заг\,факт_i}^{н.прост} - B_{заг\,план}^{н.прост})^2}{N}}. \quad (4.3)$$

Менші значення $\bar{\sigma}_{abc}$ або $\bar{\sigma}_{abc}^{kv}$ свідчать про більшу близькість фактичних результатів до запланованих, а отже, про вищу робастність графіка до збурень, що викликають ці відхилення.

Також необхідно аналізувати діапазон фактичних відхилень від запланованого значення

$$B_{заг}^{н.прост} = B_{заг_{факт, max}}^{н.прост} - B_{заг_{факт, min}}^{н.прост} \quad (4.4)$$

Графік вважається робастним, якщо малі збурення вхідних параметрів призводять до малих відхилень вихідних показників ефективності.

Робастність графіка визначається як скалярна ймовірність його успішного виконання в заданих межах допустимих відхилень протягом певного періоду часу або для заданої кількості операцій. Успішне виконання може означати, наприклад, прибуття автомобіля в пункт призначення не пізніше запланованого часу плюс деякий допустимий час (лаг) $\Delta t_{доd}$, або виконання всього оберту $t_{об}$ в межах $t_{об} \pm \delta t$. Формально, робастність $R(t)$ може бути виражена як

$$R(t) = P(t_{факт} \leq t_{план} + \Delta t_{доd}) \quad (4.5)$$

де P – ймовірність виконання події;

$t_{факт}$ – фактичний час виконання операції, хв;

$t_{план}$ – запланований час.

Якщо графік складається з послідовних незалежних операцій, кожна з яких має свою робастність R_j , то загальна робастність графіка $R_{граф}$ може бути оцінена як добуток робастностей окремих операцій

$$R_{граф} = \prod_{j=1}^n R_j \quad (4.6)$$

Однак, у транспортних системах операції часто взаємозалежні, і відхилення на одному етапі може впливати на наступні, що ускладнює розрахунок надійності і вимагає застосування методів, таких як імітаційне моделювання. Зменшення робастності може бути спричинене як частими, але малими відхиленнями, так і рідкими, але значними збоями.

Без ґрунтовної оцінки робастності впровадження навіть оптимальних, але «крихких» графіків може не лише не дати очікуваного ефекту, а й спричинити зростання витрат, простої, нераціональне використання ресурсів і каскадні збої в транспортному процесі.

Таким чином, оцінка робастності є невід'ємною частиною процесу розробки та впровадження ефективних графіків роботи транспортних систем, особливо в умовах високої невизначеності зовнішнього середовища. Характеристики графіків залежно від робастності представлені в таблиці 4.1.

Таблиця 4.1 – Характеристики операційних графіків залежно від робастності

Тип поведінки графіка	Чутливість до зовнішніх збурень	Передбачуваність виконання	Економічні наслідки
Робастний (Адаптивний)	Низька. Система поглинає малі відхилення без руйнування структури розкладу	Висока. Гарантує виконання операцій у заданих допусках у більшості сценаріїв	Оптимальні. Баланс між витратами на утримання ресурсів та штрафами за збої
Крихкий (Жорсткий)	Критично висока. Мале збурення викликає «ефект доміно» та каскадні затримки	Низька під навантаженням. Високий ризик зриву при будь-яких відхиленнях від ідеальних умов	Ризиковані. Низькі планові витрати, але експоненційне зростання фактичних збитків через черги
Надлишковий (Інертний)	Відсутня. Збурення гасяться надмірними резервами часу та ресурсів	Максимальна. Виконання гарантоване, але ціною ефективності	Неефективні. Високі постійні витрати на простій ресурсів (упущена вигода)
Хаотичний (Некерований)	Непередбачувана. Система не має механізмів компенсації відхилень	Відсутня. Результат є випадковою величиною з великою дисперсією	Катастрофічні. Максимальні сумарні втрати через повну десинхронізацію

Для оцінки робастності розроблених спільних операційних графіків виконання робіт при виконанні операцій з крос-докінгу на ЛЦ, розроблена комп'ютерна програма імітаційної моделі роботи учасників крос-докінгу по заздалегідь розробленим графікам яка дозволяє:

- враховувати специфіку задачі імітації спільної роботи вантажних автомобілів та НРП – враховувати в модель конкретні маршрути, характеристики автомобілів, параметри НРП, розроблені графіки;
- вводити випадкові відхилення – модель дозволяє враховувати випадкові відхилення на основі заданих статистичних характеристик та законів розподілу імовірностей, для ключових параметрів, таких як час навантаження, час розвантаження, швидкості руху;
- автоматизувати проведення експериментів – швидко проводити велику кількість імітаційних прогонів;
- візуалізувати та аналізувати результати – отримувати дані про фактичні показники роботи, відхилення від планових показників, час простою автомобілів та НРП.

Застосування розробленої імітаційної моделі для проведення експериментальних досліджень набуває особливої наукової та практичної ваги, оскільки такий підхід уможливлює всебічну верифікацію та валідацію запропонованих транспортних графіків, оцінюючи їхню реалістичність та практичну досяжність в умовах стохастичної природи функціонування транспортних систем.

Це дозволяє не лише підтвердити адекватність графіків, але й виявити потенційні «вузькі місця» – критичні елементи системи, такі як окремі транспортні засоби, НРП або специфічні часові інтервали, які є найбільш схильними до збоїв або генерують найбільші відхилення від запланованих параметрів. Ключовою перевагою імітаційного моделювання є надання інструментарію для кількісного визначення показників робастності графіків, що забезпечує об'єктивну характеристику їх здатності ефективно функціонувати під впливом різноманітних випадкових збурень.

Отримані в ході моделювання дані формують емпіричну основу для прийняття обґрунтованих управлінських рішень, що стосуються, зокрема, необхідності внесення коректив до існуючих графіків, формування часових резервів (буферів) для компенсації можливих затримок, а також оптимізації використання рухомого складу та інших логістичних ресурсів. Зрештою, такий підхід суттєво знижує ризики, пов'язані з практичним впровадженням розроблених графіків, мінімізуючи ймовірність значних економічних втрат, які можуть виникнути внаслідок експлуатації недостатньо робастних розкладів. Результати проведених імітаційних експериментів також слугують цінним інформаційним ресурсом для подальшого вдосконалення та оптимізації графіків з метою підвищення їхньої адаптивності до динамічно змінюваних умов реальної експлуатації.

Окрім загальних характеристик робастності, при побудові графіків спільної роботи важливо враховувати специфічні параметри функціонування окремих елементів системи, зокрема НРП. Одним із таких параметрів, що безпосередньо впливає на здатність графіка протистояти збуренням, є рівень завантаження НРМ (ρ). Цей показник відображає інтенсивність використання обладнання НРП і визначається як відношення часу безпосередньої роботи механізму до сумарного часу його роботи та запланованого простою

$$\rho = \frac{T_P}{T_P + \Delta}, \quad (4.7)$$

де T_P – час роботи НРМ, хв.;

Δ – запланований простій НРМ, хв.

Введення запланованого простою НРМ на кожне обслуговування автомобіля є інструментом підвищення робастності графіка. Такий підхід дозволяє створити певний резерв часу, який може бути використаний для компенсації можливих відхилень від запланованого розкладу, таких як запізнення автомобілів або незначні збої в роботі НРП. Завдяки цьому

запланованому буферу часу зменшується ймовірність неконтрольованого нарощування черги автомобілів на НРП. Хоча це може призвести до деякого збільшення непродуктивних простоїв самого НРП (оскільки механізм простоює навіть за відсутності збоїв), такий підхід спрямований на мінімізацію сумарних невиробничих простоїв усього транспортного комплексу (і автомобілів, і НРП).

Ключова перевага полягає у запобіганні глобальним збоям та виникненню «ефекту доміно», коли затримка на одному етапі спричиняє ланцюгову реакцію порушень у подальшій роботі системи. Управління рівнем завантаження НРП через введення обґрунтованих запланованих простоїв є важливим елементом розробки робастних графіків спільної роботи, що в кінцевому підсумку сприяє зниженню загальних логістичних витрат.

Розроблена програма використовувалась для проведення експериментальних досліджень робастності графіків доставки вантажів. Вона дозволяє моделювати роботу транспортного комплексу (вантажні автомобілі та НРП) в умовах, наближених до реальних, враховуючи можливі випадкові відхилення від запланованих показників.

Для коректної роботи програма потребує певного набору вхідних даних (рис. 4.2).

Ключовим елементом є графіки спільної роботи, які містять детальну інформацію про плановий час прибуття автомобілів, визначені маршрути, тривалість операцій навантаження та розвантаження, час оборту та інші релевантні параметри. Окрім планових графіків, важливим аспектом є можливість врахування стохастичності реальних умов, що реалізується через задання користувачем параметрів випадкових відхилень.

Програма дозволяє визначати діапазони можливих коливань для таких критичних параметрів функціонування системи, як час навантаження, час розвантаження та швидкість руху транспортних засобів.

Імітаційна модель

Вхідні дані:

час прибуття: 8:00 | час навантаження: 10 хв | реальний: 10 хв |

№ авто: 1 | час розвантаження: 10 хв | реальний: 10 хв |

№ маршруту: 1 | швидкість до к.л.: 30 км/г | реальна: 30 км/г |

час обороту: 40 хв | швидкість від к.л.: 30 км/г | реальна: 30 км/г

Інтервали відхилення:

час нав./розв.: | швидкість руху: |

мін: | макс: |

№ авто	№ маршру	час обороту	час нав.	час розв.	час до к.л.	час від к.л.	шв. до к.л.	шв. від к.л.	прибуття	вїзд з НРП	приб. до к.л.	вїзд від к.л.	приб. до НРП
1	1	1:00	0:10	0:10	0:20	0:20	30	30	8:00	8:10	8:30	8:40	9:00
2	1	1:00	0:10	0:10	0:20	0:20	30	30	8:10	8:20	8:40	8:50	9:10
3	3	1:20	0:10	0:10	0:30	0:30	30	30	8:20	8:30	9:00	9:10	9:40
4	2	0:50	0:10	0:10	0:15	0:15	30	30	8:30	8:40	8:55	9:05	9:20
5	2	0:50	0:10	0:10	0:15	0:15	30	30	8:40	8:50	9:05	9:15	9:30
1	3	1:20	0:10	0:10	0:30	0:30	30	30	9:00	9:10	9:40	9:50	10:20
2	3	1:20	0:10	0:10	0:30	0:30	30	30	9:10	9:20	9:50	10:00	10:30
4	3	1:20	0:10	0:10	0:30	0:30	30	30	9:20	9:30	10:00	10:10	10:40
5	6	0:30	0:10	0:10	0:05	0:05	30	30	9:30	9:40	9:45	9:55	10:00
3	6	0:30	0:10	0:10	0:05	0:05	30	30	9:40	9:50	9:55	10:05	10:10
5	5	1:10	0:10	0:10	0:25	0:25	30	30	10:00	10:10	10:35	10:45	11:10
3	7	0:40	0:10	0:10	0:10	0:10	30	30	10:10	10:20	10:30	10:40	10:50
1	7	0:40	0:10	0:10	0:10	0:10	30	30	10:20	10:30	10:40	10:50	11:00
2	4	1:30	0:10	0:10	0:35	0:35	30	30	10:30	10:40	11:15	11:25	12:00

Результати:

Сумарний час простою автомобіля: хв |

Сумарний час простою механізму: хв

Час відхилення руху автомобіля: хв

Загальні витрати від простою: грн

Витрати від простою:

Простой автомобіля: грн/хв

Простой механізму: грн/хв

Рисунок 4.2 – Інтерфейс програми імітаційної моделі

Для проведення економічного аналізу та розрахунку наслідків простоїв програма використовує вартісні показники простою різних учасників транспортного процесу, що відображено на рисунку 4.3.

Імітаційна модель

Вхідні дані:

час прибуття: 8:00 | час навантаження: 10 хв | реальний: 10 хв |

№ авто: 1 | час розвантаження: 10 хв | реальний: 10 хв |

№ маршруту: 1 | швидкість до к.л.: 30 км/г | реальна: 30 км/г |

час обороту: 40 хв | швидкість від к.л.: 30 км/г | реальна: 30 км/г

Інтервали відхилення:

час нав./розв.: | швидкість руху: |

мін: | макс: |

№ авто	№ маршру	час обороту	час нав.	час розв.	час до к.л.	час від к.л.	шв. до к.л.	шв. від к.л.	прибуття	вїзд з НРП	приб. до к.л.	вїзд від к.л.	приб. до НРП
1	1	1:04	0:13	0:14	0:17	0:20	35	30	8:00	8:13	8:30	8:44	9:04
2	1	0:57	0:10	0:15	0:16	0:16	37	37	8:13	8:23	8:39	8:54	9:10
3	3	1:05	0:07	0:10	0:22	0:26	40	34	8:23	8:30	8:52	9:02	9:28
4	2	0:44	0:09	0:07	0:16	0:12	28	38	8:30	8:39	8:55	9:02	9:14
5	2	0:48	0:10	0:07	0:11	0:20	40	23	8:40	8:50	9:01	9:08	9:28
1	3	1:19	0:15	0:12	0:22	0:30	40	30	9:04	9:19	9:41	9:53	10:23
2	3	1:20	0:08	0:08	0:29	0:35	31	26	9:19	9:27	9:56	10:04	10:39
4	3	1:22	0:11	0:14	0:31	0:26	29	35	9:27	9:38	10:09	10:23	10:49
5	6	0:28	0:08	0:11	0:04	0:05	34	28	9:38	9:46	9:50	10:01	10:06
3	6	0:26	0:07	0:08	0:06	0:05	27	28	9:46	9:53	9:59	10:07	10:12
5	5	1:14	0:08	0:10	0:33	0:23	23	33	10:06	10:14	10:47	10:57	11:20
3	7	0:49	0:12	0:09	0:14	0:14	21	22	10:14	10:26	10:40	10:49	11:03
1	7	0:39	0:07	0:10	0:10	0:12	30	26	10:26	10:33	10:43	10:53	11:05
2	4	1:19	0:08	0:10	0:28	0:33	38	32	10:39	10:47	11:15	11:25	11:58

Результати:

Сумарний час простою автомобіля: хв |

Сумарний час простою механізму: хв

Час відхилення руху автомобіля: хв

Загальні витрати від простою: грн

Витрати від простою:

Простой автомобіля: грн/хв

Простой механізму: грн/хв

Рисунок 4.3 - Інтерфейс програми для визначення вартісних показників

Розроблена програма володіє широким спектром функціональних можливостей, спрямованих на комплексне моделювання та аналіз транспортних процесів. Центральною функцією є імітація транспортного процесу, що включає моделювання повної послідовності подій: від прибуття автомобіля на пункт навантаження, через сам процес навантаження, подальший рух до пункту розвантаження, операцію розвантаження і до повернення транспортного засобу.

Важливою складовою є врахування випадкових факторів, де під час імітації програма динамічно вносить випадкові відхилення у заплановані показники, такі як час виконання операцій та швидкість руху, базуючись на попередньо заданих користувачем параметрах розподілу ймовірностей. Результати кожної реалізації імітаційного експерименту формують масив симульованих показників (моменти настання подій та тривалості технологічних операцій), необхідних для статистичного аналізу робастності графіка.

На основі порівняння планових та фактичних даних програма виконує визначення відхилень та простоїв, зокрема розраховує час простою автомобілів в очікуванні навантаження-розвантаження, час непродуктивного простою самих НРМ, а також величину відхилення від запланованого часу прибуття автомобілів до ключових точок маршруту.

Для оцінки економічної ефективності передбачена економічна оцінка, де на основі розрахованого часу простоїв та закладених вартісних показників програма обчислює загальну вартість простоїв, інтерпретуючи їх як збитки. Для подальшого глибокого аналізу реалізовано функцію збереження результатів імітаційного експерименту, які можуть експортуватися в окремі файли у форматі, сумісному з Excel. Це дозволяє детально обробляти дані, щодо простоїв рухомого складу, НРП та відхилень часу прибуття, і використовувати їх при розробці вдосконалених методик складання раціональних графіків. Програма також забезпечує наочну візуалізацію даних – її інтерфейс відображає табличні дані (вхідні параметри, проміжні

симульовані показники та кінцеві результати). Для підтримки прийняття оперативних рішень критичні відхилення від запланованого часу можуть виділятися кольоровим підсвічуванням.

Розроблена програма відрізняється низкою характерних особливостей, що визначають її специфіку та цінність. Насамперед, це чітка орієнтація на дослідження робастності розроблених графіків, де головною метою є не стільки пошук теоретичного оптимуму, скільки всебічна перевірка здатності запропонованих розкладів ефективно функціонувати в умовах неминучої невизначеності реальних транспортних операцій. Важливою перевагою є забезпечення сумісності програми з іншими системами аналізу даних. Це реалізується через експорт змодельованих та розрахункових даних у стандартизованих форматах, що значно розширює аналітичні можливості користувача для поглибленої обробки та візуалізації результатів. Програма забезпечує високий рівень деталізації результатів, надаючи вичерпну інформацію щодо кожного окремого автомобіля та кожної запланованої «їздки» (рейсу), що формує аналітичну основу для глибокого аналізу причин виникнення відхилень часових параметрів та розробки ефективних коригувальних заходів.

В якості цільової функції, що підлягає мінімізації, виступають сумарні витрати від непродуктивних простоїв транспортних засобів та НРМ за певний період функціонування системи. Основним керованим параметром є рівень завантаження НРМ, ρ . Цей показник, визначений у формулі (4.7), регулюється через зміну величини запланованого простою, Δ , що закладається в графік на обслуговування кожного транспортного засобу. Зменшення Δ призводить до зростання ρ , що означає більш щільний графік роботи НРМ та менший вбудований часовий буфер для компенсації відхилень.

Таким чином, експеримент полягає у дослідженні залежності $B_{заг}^{н.прост} = f(\rho)$. Пошук оптимального рівня завантаження, ρ^* , зводиться до знаходження глобального мінімуму цієї функції. Для вирішення поставленої

задачі застосовується методологія планування експерименту. Проведено серію імітаційних експериментів для дискретного набору значень рівня завантаження ρ . Діапазон значень ρ обрано від 0,80 (що відповідає значним часовим резервам та низькій інтенсивності використання механізму) до 0,99 (що відповідає практично максимальному завантаженню з мінімальною величиною запланованого простою) з кроком 0,01. Такий діапазон дозволяє повноцінно дослідити поведінку системи від стану з високою надлишковістю до стану, близького до перевантаження.

Усі експериментальні дослідження проводились з використанням розробленої комп'ютерної програми імітаційної моделі. Модель враховує стохастичний характер транспортних процесів шляхом введення випадкових відхилень у ключові параметри: час руху автомобілів за маршрутами, а також тривалість операцій навантаження та розвантаження. Ці відхилення генеруються на основі заданих законів розподілу, що дозволяє адекватно відтворювати невизначеність реальних умов експлуатації. Саме випадковий характер процесів робить задачу оптимізації актуальною, оскільки в детермінованому випадку оптимальним завжди було б $\rho=1$.

Постановка такого експерименту дозволяє вийти за межі простого пошуку числового значення. Це дослідження фундаментального компромісу між двома парадигмами управління логістичними системами: «ощадливою» та «робастною». Високі значення ρ відповідають «ощадливому» підходу, що прагне до максимального використання ресурсів та усунення будь-яких запланованих простоїв, які розглядаються як втрати. Низькі значення ρ втілюють «робастний» підхід, який свідомо створює резерви для поглинання непередбачуваних збоїв та забезпечення стабільності функціонування системи в умовах невизначеності. Оптимальний рівень завантаження ρ^* є точкою, де система досягає найбільш ефективного балансу між економією та робастністю для заданого рівня стохастичності зовнішнього середовища.

Результати проведеної серії імітаційних експериментів дозволяють кількісно оцінити вплив рівня завантаження НРМ на ключові економічні

показники системи. Аналіз цих залежностей є основою для визначення економічно обґрунтованого режиму роботи. Насамперед, необхідно розглянути, як змінюються окремі компоненти сумарних витрат – витрати від простою автомобілів та витрати від простою механізму – залежно від зміни ρ .

При низьких значеннях ρ , що відповідає наявності значних часових резервів у графіку роботи НРМ, витрати від простою автомобілів є мінімальними. Система легко компенсує випадкові запізнення, і черги практично не виникають. Однак, у міру зростання ρ (тобто зі зменшенням запланованих резервів часу), система стає все більш чутливою до будь-яких відхилень. Навіть незначна затримка одного автомобіля може спричинити ланцюгову реакцію, що призводить до формування черги та тривалого очікування для наступних автомобілів. Ця залежність має нелінійний, експоненційний характер – після досягнення певного критичного рівня завантаження витрати від непродуктивного простою автомобілів починають стрімко зростати.

Витрати від простою механізму, ця складова витрат має протилежну динаміку. За визначенням, при низькому рівні завантаження ρ механізм має значний запланований простій Δ , що призводить до високих витрат, пов'язаних з його невикористанням. Зі збільшенням ρ запланований простій скорочується, і витрати від простою механізму зменшуються практично лінійно.

Сума двох протилежних за динамікою функцій витрат формує сумарну вартість непродуктивних простоїв $B_{заг}^{н.прост}$. Графік залежності середніх сумарних витрат від рівня завантаження ρ має характерну U-подібну форму, що є класичним результатом для задач оптимізації резервів у системах масового обслуговування. Точка мінімуму цієї кривої відповідає економічно оптимальному рівню завантаження ρ^* . Це значення є точкою балансу, де додаткові витрати від збільшення простоїв автомобілів стають рівними економії від зменшення простою механізму.

Результати імітаційного експерименту, отримані після проведення імітаційних експериментів для кожного рівня ρ , наведені в таблиці 4.2.

Згідно з представленими даними, мінімальні сумарні середні витрати на рівні 1810 грн досягаються при рівні завантаження $\rho^*=0,92$. Будь-яке відхилення від цього значення в обидва боки призводить до зростання загальних витрат. Важливою характеристикою є не лише точка мінімуму, але й форма кривої сумарних витрат поблизу цього оптимуму (рис. 4.4).

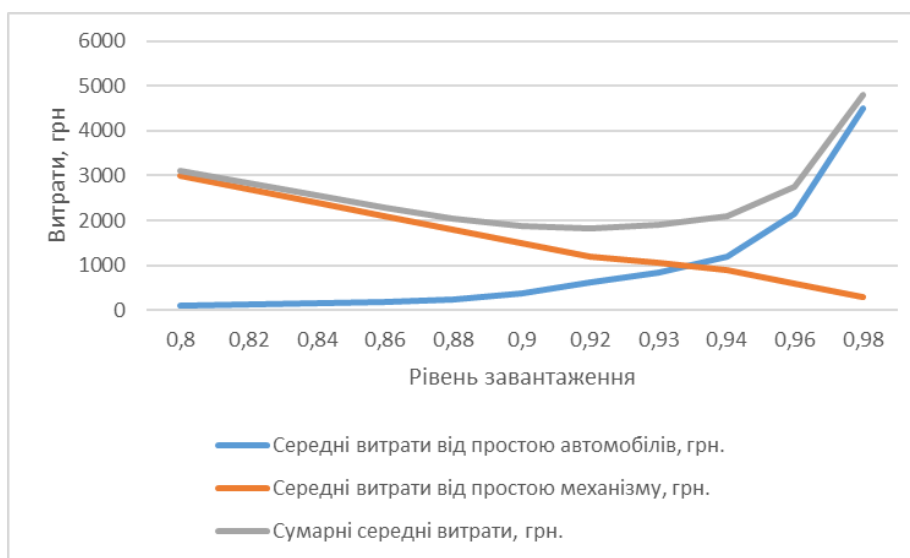


Рисунок 4.4 – Графік залежностей витрат від рівня завантаження

Якщо локальний мінімум є різко вираженим, тобто функція має велику кривизну, це свідчить про підвищену вразливість системи до відхилень параметрів. У такому разі навіть незначна помилка у плануванні може призвести до різкого збільшення очікуваних сумарних витрат. Така система вимагає надзвичайно точного оперативного планування та жорсткого контролю.

Навпаки, якщо крива є пологою та широкою біля мінімуму, це вказує на більшу робастність системи. У такому випадку існує певний діапазон значень ρ , в межах якого система функціонує з близькою до оптимальної ефективністю, що надає диспетчеру більше операційної свободи та робить систему більш толерантною до неточностей у плануванні.

Таблиця 4.2 – Результати імітаційного експерименту для визначення оптимального рівня завантаження механізму

Рівень завантаження	Середні витрати від простою автомобілів, грн.	Середні витрати від простою механізму, грн.	Сумарні середні витрати, грн.	Стандартне відхилення сумарних витрат, грн.	Коефіцієнт варіації сумарних витрат
0,80	115	3000	3115	280	0,090
0,82	130	2700	2830	295	0,104
0,84	155	2400	2555	310	0,121
0,86	190	2100	2290	345	0,151
0,88	250	1800	2050	390	0,190
0,90	380	1500	1880	470	0,250
0,92	610	1200	1810	580	0,320
0,93	850	1050	1900	700	0,368
0,94	1200	900	2100	880	0,419
0,96	2150	600	2750	1250	0,455
0,98	4500	300	4800	2400	0,500

Економічна ефективність, виражена через середні сумарні витрати, є лише одним із критеріїв оцінки транспортної системи. Не менш важливими є її експлуатаційні характеристики, такі як робастність, які визначають передбачуваність результатів та якість обслуговування. Аналіз повинен виходити за межі суто економічних показників і досліджувати баланс між ефективністю та робастністю системи. Зокрема, аналіз має кількісно оцінити, як вибір рівня завантаження ρ впливає на операційну робастність розроблених графіків в умовах стохастичної невизначеності.

Робастність графіка характеризує його здатність зберігати показники ефективності в певних межах при впливі випадкових збурень. Кількісною мірою параметричної робастності може слугувати коефіцієнт варіації сумарних витрат. Цей показник відображає відносний розкид результатів імітаційних прогонів навколо математичного очікування. Чим менший коефіцієнт варіації, тим більш робастним є результат роботи системи.

Дані з таблиці 4.2 чітко демонструють монотонне зростання коефіцієнта варіації зі збільшенням рівня завантаження ρ . Наприклад, при $\rho=0,8$ коефіцієнт варіації становить лише 0,09, що свідчить про високу робастність системи – результати від прогону до прогону дуже близькі. Однак при економічно оптимальному $\rho^*=0,92$, коефіцієнт варіації зростає до 0,32, а при $\rho=0,98$ досягає 0,5. Це означає, що хоча графік із високим рівнем завантаження (ρ) може мати низьке математичне очікування сумарних витрат, його результати є значно менш передбачуваними. Високе значення коефіцієнта варіації створює значні операційні ризики – в окремі цикли система може функціонувати оптимально, тоді як в інші зазнавати критичних збоїв та генерувати витрати, що суттєво перевищують середнє очікуване значення.

Робастність графіка визначається як ймовірність його виконання без перевищення допустимих затримок, що безпосередньо впливає на рівень обслуговування клієнтів. За результатами імітації її оцінюють як частку прогонів, у яких усі рейси завершені в межах планового часу з урахуванням

допустимого відхилення. При низьких ρ великі часові резерви практично гарантують своєчасне виконання всіх операцій, і робастність наближається до 100 %. Зі зростанням ρ та зменшенням резервів ймовірність того, що накопичені випадкові затримки перевищать допустимі межі, зростає. При досягненні критичних значень ρ , близьких до 1,0, робастність стрімко падає, оскільки система втрачає будь-яку здатність до саморегуляції.

Аналіз показує, що економічний оптимум ($\rho^* = 0,92$) не збігається з оптимумом за критерієм робастності (який досягаються при нижчих значеннях ρ). Це виявляє фундаментальний компроміс – підвищення економічної ефективності досягається ціною зниження передбачуваності та робастності графіків.

Для ухвалення обґрунтованого управлінського рішення доцільно візуалізувати цей компроміс, побудувавши криву «вартості робастності». Для цього необхідно на графіку по осі абсцис відкласти рівень робастності $R(t)$, а по осі ординат – відповідні йому мінімально досяжні середні сумарні витрати (отримані з даних для різних ρ). Така крива наочно демонструє, скільки компанії коштує кожен додатковий відсоток робастності. Наприклад, перехід від 90 % до 95 % робастності може вимагати збільшення середніх витрат на 5 %, тоді як подальше підвищення робастності з 98 % до 99 % може коштувати вже 20% додаткових витрат.

Для побудови цієї кривої зводимо дані з таблиці 4.2 (залежність витрат від рівня завантаження ρ) та результати аналізу робастності для кожного рівня ρ . Робастність, $R(t)$, розраховується як частка імітаційних прогонів, у яких усі операції були виконані в межах допустимого відхилення (не більше 10 хвилин від плану).

На основі результатів моделювання було сформовано наступну зведену таблицю, що пов'язує рівень завантаження, робастність та середні витрати (табл. 4.3).

Побудована графічна залежність (рис 4.5) є інструментом для ухвалення стратегічних рішень. Він переводить операційне питання «який

рівень завантаження встановити?» у стратегічне питання «який рівень робастності ми хочемо забезпечити нашим клієнтам і скільки ми готові за це платити?». Керівництво компанії, спираючись на цей аналіз, може свідомо обрати свою позицію на кривій, що відповідає її ринковій стратегії, вимогам клієнтів та готовності до ризику.

Таблиця 4.3 – Зведені дані для побудови кривої «вартості робастності»

Рівень завантаження	Робастність графіка, (%)	Сумарні середні витрати, грн
0,80	99,5	3115
0,82	99,0	2830
0,84	98,0	2555
0,86	97,0	2290
0,88	96,0	2050
0,90	95,5	1880
0,92	95,0	1810
0,93	94,0	1900
0,94	92,0	2100
0,96	85,0	2750
0,98	70,0	4800

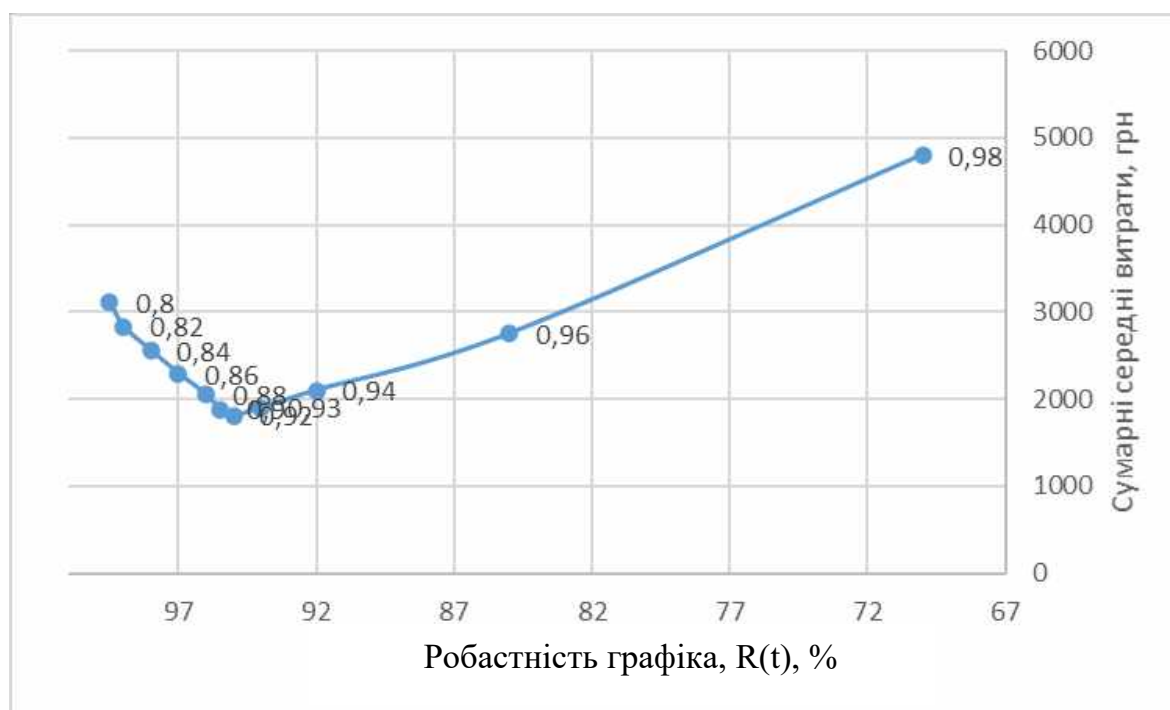


Рисунок 4.5 – Графік «вартість робастності»

В результаті аналізу графіку «вартості робастності» можливо визначити зону високої вартості та високої робастності (ліва частина кривої, $R > 97 \%$). У цій зоні система працює з низьким рівнем завантаження ($\rho < 0,86$). Великі часові резерви практично гарантують виконання графіка без збоїв, забезпечуючи робастність, близьку до 100 %. Однак, ціна такої гарантії є високою – значні заплановані простої НРМ призводять до великих сумарних витрат. Кожен додатковий відсоток робастності в цій зоні коштує дуже дорого. Цей режим роботи може бути виправданий для перевезення критично важливих вантажів (наприклад, медикаментів), де зрив термінів є неприпустимим.

Зона економічного оптимуму (центральна, найнижча частина кривої, ($R \approx 94-96 \%$) в якій знаходиться точка мінімальних сукупних витрат ($\rho = 0,92$, $B_{заг}^{н.прост} = 1810$ грн, $R(t) = 95 \%$). Це зона найкращого балансу між вартістю простою ресурсів та вартістю збоїв, спричинених стохастичними факторами. Система все ще має достатньо вбудованих резервів, щоб поглинати більшість відхилень, але при цьому її ресурси використовуються досить інтенсивно. Робота в цій зоні є найбільш економічно обґрунтованою для більшості стандартних логістичних операцій.

Зона високого ризику (права частина кривої, $R < 92 \%$). У цій зоні спроба досягти максимального завантаження ресурсів ($\rho = 0,94$) призводить до різкого падіння робастності. Система стає «крихкою» та вкрай чутливою до найменших збурень. Незначні затримки провокують каскадні збої, що призводить до експоненційного зростання витрат від простою автомобілів у чергах. Крива стрімко йде вгору, демонструючи, що надмірна економія на запланованих резервах призводить до катастрофічних втрат. Робота в цій зоні є вкрай ризикованою та економічно не вигідною.

4.2 Апробація імітаційної моделі крос-докінгу на прикладі логістичного терміналу

Інтеграція транспортної системи України до європейської мережі TEN-T та зростання товарообігу з країнами ЄС висувають підвищені вимоги до ефективності транспортно-логістичних вузлів, що функціонують у сфері міжнародних вантажних перевезень. Технологія крос-докінгу є одним з інструментів інтенсифікації вантажопереробки, що дозволяє скоротити час логістичного циклу та мінімізувати потребу у складських площах.

Для апробації розробленої імітаційної моделі (розділ 3.2) обрано умовний крос-докінговий термінал, що функціонує за профілем діяльності та географічним розташуванням, аналогічним до терміналів міжнародної логістичної групи Raben Group у західному регіоні України (Львівська область). Термінал розташований поблизу міжнародної автомагістралі E40/M10 і виконує функцію концентраційного хабу для вантажів, що прямують з України до ЄС. Розглядалися можливі доставки вантажів до столиць країн Євросоюзу від найближчої до найвіддаленішої.

Основна операційна задача терміналу – консолідація збірних вантажів (LTL), що доставляються середньотоннажними дистрибуційними автомобілями з промислових центрів України, та їх перевантаження у магістральні автопоїзди (єврофури) для подальшого транспортування до логістичних хабів Raben у Польщі та Німеччині. Ефективність функціонування терміналу визначається його рівнем своєчасності відправлень та величиною загальних витрат.

Розроблена імітаційна модель виступає в ролі цифрового двійника операційних процесів терміналу, дозволяючи проводити всебічний аналіз його функціонування за різних умов.

Для комплексної перевірки адекватності моделі було проведено два експерименти, що відображають критичні режими функціонування

терміналу: аналіз еластичності ресурсів та виявлення «вузького місця», та порівняльний аналіз стратегії диспетчеризації.

Для забезпечення відтворюваності та прозорості дослідження, всі експерименти базувалися на єдиному наборі вхідних даних, що імітує 8-годинну робочу зміну. Цей набір складається з параметрів ресурсів, ставок витрат на виконання технологічних операцій та фіксованого графіка руху транспортних засобів (табл. 4.4 – 4.7)

Таблиця 4.4 – Технологічні та ресурсні параметри терміналу

Параметр	Значення
Кількість доків, од.	6
Всього робітників, чол.	12
Всього НРМ, од.	6
Норматив персоналу на док, чол./док	2
Норматив НРМ на док, од./док	1

Таблиця 4.5 – Економічні параметри роботи терміналу

Параметр	Значення (грн/год)
Вартість простою дистрибуційного авто	250
Вартість простою магістрального автопоїзда	300
Годинна тарифна ставка робітника	200
Годинна тарифна ставка роботи НРМ	500
Вартість використання інфраструктури доку	150
Штраф за запізнення	5000

Таблиця 4.6 – Характеристика процесу обслуговування вхідного потоку ТЗ на терміналі

ID Авто	Час прибуття	Час обробки (год)	Пріоритет
IN-01	08:06	1,2	5
IN-02	08:15	0,8	5
IN-03	08:30	1,5	5
IN-04	09:12	0,7	5
IN-05	09:48	1,0	2
IN-06	10:30	1,3	5
IN-07	11:06	0,9	5
IN-08	12:00	1,1	5
IN-09	12:30	0,6	5
IN-10	13:12	1,4	3
IN-11	14:00	0,8	5
IN-12	14:30	1,0	5

Таблиця 4.7 – Характеристика процесу обслуговування вихідного потоку ТЗ на терміналі

ID Авто	Час прибуття	Час обробки (год)	Пріоритет	Залежності (від ID вхідних)	Дедлайн відправлення
OUT-A	08:00	1,0	5	IN-01, IN-02	11:00
OUT-B	08:00	1,3	5	IN-01, IN-03	12:00
OUT-C	08:00	0,8	2	IN-04, IN-05	11:30
OUT-D	09:00	1,5	5	IN-03, IN-06, IN-07	14:00
OUT-E	10:00	1,1	5	IN-08, IN-09	15:30
OUT-F	11:00	1,6	3	IN-02, IN-05, IN-08, IN-10	15:00
OUT-G	12:00	0,9	5	IN-11, IN-12	16:00

З метою визначити оптимально збалансованої конфігурації трьох ключових ресурсів (доки, робітники, техніка), було проведено серію симуляцій, що охоплюють ключові конфігурації, параметри змінювалися

таким чином, кількість доків від 4 до 6 од., кількість робітників від 8 до 12 чол., кількість НРМ від 4 до 6 од., для роботи одного доку потрібно 2 робітники та 1 одиниця НРМ. Всі інші параметри залишалися на базовому рівні (Таблиці 4.4 – 4.7). Результати розрахунків представлено в таблиці 4.8 та на рисунку 4.6.

Таблиця 4.8 – Результати симуляції залежно від конфігурації ресурсів

Конфігурація (доки/роб./тех.)	4/10/5	5/8/5	5/10/4	5/10/5	6/12/6
Ключові метрики					
Кількість запізнення, од.	1	1	1	1	1
Середній час очікування, год.	1,08	1,08	1,08	0,81	0,81
Складові витрат					
Витрати на простій дистрибуційного авто, грн	15200	15200	15200	9150	9150
Витрати на простій магістрального автопоїзда, грн	20110	20110	20110	12560	12560
Витрати на персонал, грн	53200	53200	53200	53200	53200
Витрати на техніку, грн	66500	66500	66500	66500	66500
Штрафи за запізнення, грн	5000	5000	5000	5000	5000
Витрати на використання доків, грн	8800	11800	11800	11800	15100
Загальні витрати, грн	168810	171810	171810	158210	161510

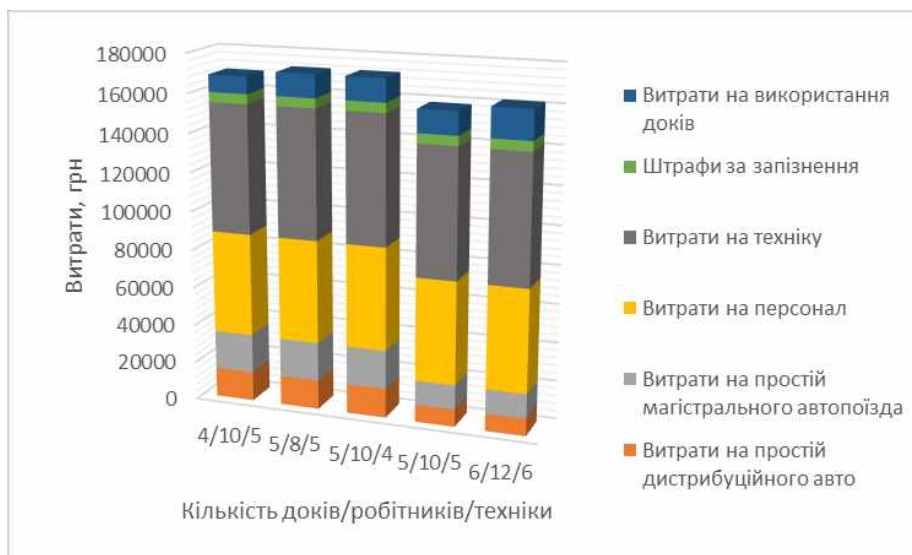


Рисунок 4.6 – Структура загальних витрат залежно від рівня забезпеченості ресурсами терміналу

Конфігурація 5/10/5 забезпечує досягнення економічного та операційного оптимуму. Ресурсна структура є збалансованою, наявний персонал та техніка повністю покривають потреби для одночасного функціонування всіх п'яти доків. Це дозволяє системі працювати з максимальною пропускнуною спроможністю що забезпечує мінімізацію середнього часу очікування (0,81 год) та відповідно, зниження витрат на простій до мінімального значення. У сукупності це забезпечує мінімальні загальні витрати серед усіх аналізованих конфігурацій, що підтверджує її раціональність та економічну доцільність.

У випадку конфігурації 4/10/5 система зазнає обмежень через інфраструктурний дефіцит. Попри достатність персоналу та техніки для обслуговування п'яти доків, їхнє використання стримується наявністю лише чотирьох. Це зумовлює збільшення середнього часу очікування на 33 % (з 0,81 до 1,08 год) та підвищення витрат на простій на 63 %, що суттєво нівелює економію від зменшення витрат на утримання доків. У результаті загальні витрати зростають на 6,7 % у порівнянні з раціональною конфігурацією ресурсів.

У конфігурації 5/8/5 обмежувальним чинником виступає дефіцит робочої сили. Незважаючи на наявність п'яти доків, одночасно функціонувати можуть лише чотири через нестачу працівників. Це знижує фактичну продуктивність системи до рівня де використовується 4 доки. При цьому додаткові витрати на утримання п'ятого, але нефункціонуючого, доку спричиняють найбільші загальні витрати серед усіх сценаріїв + 8,6 % до раціонального значення.

У конфігурації 5/10/4 аналогічний ефект обумовлюється нестачею технічних засобів. Дефіцит одного навантажувача обмежує можливість одночасної роботи п'яти доків, фактично знижуючи продуктивність до рівня де використовується 4 доки. Загальні витрати сягають того ж рівня, що й у попередній конфігурації ресурсів. Це підтверджує, що інвестиції в інфраструктуру (доки) не є ефективними без пропорційного забезпечення мобільними ресурсами (персонал і техніка).

У конфігурації 6/12/6 збільшення кількості всіх ресурсів не призводить до покращення операційних показників. Середній час очікування та витрати на простій залишаються на рівні раціональної конфігурації ресурсів. Це вказує на те, що у такій ситуації обмежувальним чинником стають зовнішні умови – інтенсивність і ритміка прибуття транспортних засобів та технологічні залежності. Водночас додаткові витрати на утримання надлишкових ресурсів, зокрема шостого доку, збільшують загальні витрати на 2 %, що ілюструє дію закону спадної віддачі.

Результати моделювання свідчать, що «вузьке місце» системи має динамічний характер та визначається дисбалансом між видами ресурсів:

- у конфігурації ресурсів 4/10/5 ним є кількість доків;
- у конфігурації ресурсів 5/8/5 – кількість працівників;
- у конфігурації ресурсів 5/10/4 – кількість техніки;
- у конфігураціях ресурсів 5/10/5 та 6/12/6, де внутрішні ресурси збалансовані або надлишкові, обмеження переходить на рівень зовнішніх факторів (графік прибуття транспорту, технологічна логіка процесів).

Таким чином, ефективність функціонування системи визначається її найслабшою ланкою. Оптимізація вимагає системного та збалансованого підходу до інвестування у всі види ресурсів, оскільки дефіцит одного з них нівелює позитивний ефект від надлишку інших.

Для оцінки економічного ефекту від застосування вбудованої в модель пріоритетної евристики диспетчеризації порівняно з простою дисципліною черги «перший прийшов – перший обслужений» (FIFO), було проведено дві симуляції на базовій конфігурації (5 доків). Пріоритетне планування, для формування черги використовувалися пріоритети, визначені у таблицях 4.6 та 4.7. Вирішальним чинником стала обробка замовлення OUT-C, яке має високий рівень пріоритету (2) та жорстке обмеження за часом відправлення (11:30). У моделі воно ідентифікується як критичне завдання, і після завершення відповідних вхідних процесів (IN-04, IN-05) отримує найвищий пріоритет у черзі. Це забезпечує своєчасне відправлення (або мінімальне відхилення від дедлайну) та дозволяє уникнути штрафних санкцій. Запізнення фіксується лише для автомобіля з нижчим рівнем пріоритету.

У стратегії FIFO всі автомобілі мали однаковий пріоритет (5), тому черга формувалася лише за часом прибуття. У результаті автомобіль OUT-C очікував після менш критичних завдань, що спричинило зрив терміну відправлення та штрафні витрати (5000 грн). Також відзначено невелике зростання середнього часу перебування автомобіля в системі та витрат на простій, що свідчить про зниження ефективності управління чергою. Розрахунки наведено в таблиці 4.9.

Таблиця 4.9 – Порівняння результатів для різних стратегій планування

Показник	Пріоритетне планування (База)	FIFO (однаковий пріоритет)
Ключові метрики		
Кількість запізнення	1	2
Середній час в системі, год.	2,98	3,01
Середній час очікування, год.	0,81	0,83
Складові витрат		
Витрати на простій дистрибуційного авто, грн	9150	9400
Витрати на простій магістрального автопоїзда, грн	12560	12759
Витрати на персонал, грн	53200	53200
Витрати на техніку, грн	66500	66500
Штрафи за запізнення, грн	5000	10000
Витрати на використання доків, грн	11800	11600
Загальні витрати, грн	158210	163459

Застосування пріоритетного планування дозволило зменшити загальні витрати на 5249,33 грн у порівнянні з FIFO, що пояснюється більш гнучким механізмом диспетчеризації та здатністю системи враховувати критичність замовлень (рис. 4.7). Отримані результати підтверджують, що врахування пріоритетів та дедлайнів є ключовим фактором підвищення фінансової ефективності функціонування логістичних систем крос-докінгу.

Результати імітаційних експериментів підтвердили, що розроблена модель адекватно відображає логіку та динаміку функціонування крос-докінгового терміналу (табл. 4.10).

Проведена перевірка підтверджує адекватність імітаційної моделі, оскільки вона відтворює логіку операцій крос-докінгу, забезпечує реалістичні значення ключових показників та демонструє очікувану чутливість до змін

параметрів. Це дозволяє використовувати модель як надійний інструмент для аналізу та оптимізації функціонування логістичних терміналів.

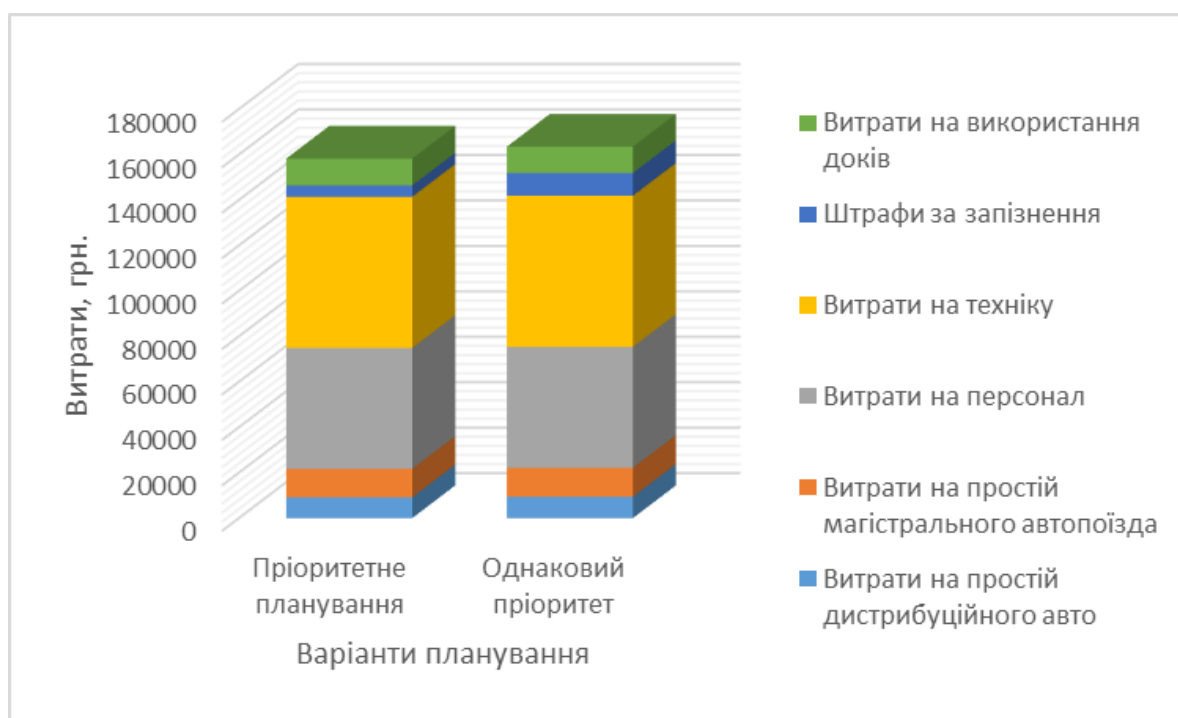


Рисунок 4.7 – Порівняння результатів стратегій планування: FIFO проти пріоритетного алгоритму

Таблиця 4.10 – Перевірка адекватності імітаційної моделі крос-докінгу

Критерій перевірки	Результат перевірки
Відповідність логіці процесів	Модель відтворює основні етапи роботи терміналу: прибуття авто, розвантаження, перевантаження та відправлення вихідних рейсів
Відтворення типових показників	Показники (час очікування, витрати на простій, штрафи) відповідають реальним закономірностям логістичних систем
Чутливість до змін параметрів	При дефіциті окремих ресурсів виникають «вузькі місця», а надлишок призводить до дії закону спадної віддачі
Стійкість результатів	Результати зберігають узгодженість у різних серіях експериментів та при варіації параметрів
Практична інтерпретованість	Висновки щодо стратегій планування (FIFO vs пріоритети) узгоджуються з реальною практикою управління транспортними потоками

4.3 Дослідження впливу ключових факторів на ефективність схем доставки вантажів

Експеримент є одним із фундаментальних методів наукового пізнання, що полягає у навмисному створенні або зміні певного явища в контрольованих умовах найчастіше в лабораторному середовищі, з метою глибокого вивчення його природи, закономірностей розвитку та реакції на зовнішні впливи [149]. Завдяки експерименту дослідник може не лише спостерігати за перебігом процесу, а й активно керувати ним, отримуючи об'єктивні дані для формулювання висновків і перевірки гіпотез.

Планування експерименту – це цілісна система дій, спрямована на раціональну організацію дослідницького процесу, що дозволяє досягти максимальної інформативності результатів при оптимальному використанні ресурсів. Основна мета полягає в отриманні точних, достовірних і статистично обґрунтованих даних за мінімальної кількості проведених випробувань. Такий підхід дозволяє суттєво скоротити витрати часу, матеріалів і фінансів, що особливо важливо в умовах складних або дорогих експериментів.

Процес планування включає визначення мети дослідження, вибір незалежних змінних (факторів), встановлення рівнів їх варіювання, кількості дослідів, а також методів аналізу отриманих даних. У науковій практиці використовуються різні підходи до планування – зокрема, факторний аналіз, метод повно факторного планування, дробове факторне планування, оптимальне планування та інші статистичні методики.

Планування експерименту застосовується для вирішення широкого спектру завдань, серед яких:

- визначення оптимальних умов проведення експериментів;
- побудова математичних або інтерполяційних моделей процесів;
- виявлення найбільш впливових факторів серед великої кількості змінних;

- оцінювання та уточнення параметрів, що входять до складу теоретичних моделей;
- підвищення повторюваності та відтворюваності результатів;
- виявлення можливих взаємодій між факторами.

Таким чином, планування експерименту є ключовим інструментом для підвищення якості наукових досліджень, забезпечення надійності висновків та ефективного використання доступних ресурсів.

Кодування факторів є обов'язковим для перетворення натуральних факторів у безрозмірні величини, що дозволяє побудувати стандартну ортогональну план-матрицю експерименту. Інтервал варіювання визначається як різниця між верхнім та нижнім рівнями фактору, а їх обчислення називається відповідно верхнім і нижнім інтервалом. Важливо, щоб інтервал варіювання не був меншим за помилку, з якою експериментатор фіксує рівень фактору, та не виходив за межі області призначення фактору. Для зручності рівні факторів зазвичай кодують.

Повнофакторний експеримент є одним із фундаментальних методів наукових досліджень, що застосовується для вивчення впливу кількох незалежних факторів на досліджуваний результат [149]. Його суть полягає у проведенні випробувань за всіма можливими комбінаціями рівнів факторів, що забезпечує комплексність аналізу та підвищує достовірність висновків.

Основні переваги методу:

- урахування взаємодії факторів, повнофакторний підхід дозволяє досліджувати не лише індивідуальний вплив кожного фактора, а й комбіновану дію кількох факторів одночасно, що особливо важливо для складних логістичних і транспортних систем;
- виділення головних ефектів, кожен фактор може бути проаналізований окремо, що дає змогу зрозуміти його прямий вплив на результативний показник;
- виявлення прихованих закономірностей, завдяки перевірці всіх можливих комбінацій факторів можливо виявити неочікувані або

нетривіальні взаємодії, які ускладнюють або, навпаки, покращують функціонування системи.

- статистична надійність, отриманий обсяг даних є достатнім для застосування методів статистичного аналізу, зокрема аналізу варіацій, регресійного аналізу чи побудови математичних моделей прогнозування;
- універсальність застосування, повнофакторний експеримент використовується як у технічних і природничих науках, так і в економіці, логістиці та управлінні, коли необхідно оцінити багатофакторні процеси.

Загальне число дослідів для повного факторного експерименту з k змінюваними факторами (якщо кожний з них має те саме число рівнів m) буде

$$N_{\text{ПФЕ}} = m^k. \quad (4.8)$$

де m – число рівнів кожного фактору;

k – число факторів.

Кількість серій дослідів складає

$$m^k = 2^4 = 16 \text{ серій дослідів.}$$

Оскільки було обрано 2 рівні варіювання, позначимо їх наступним чином: «-» – 1-й рівень варіювання (min), «+» – 2-й рівень варіювання (max). Після цього усі можливі комбінації сполучень заносимо до таблиці 4.11.

Таблиця 4.11 – План експерименту

Серія дослідів	Рівні варіювання вхідних факторів			
	Інтенсивність надходження заявок за добу, од.	Середній обсяг одного замовлення, т	Кількість відправників вантажу, од.	Кількість одержувачів вантажу, од.
1	2	3	4	5
Серія 1	-	-	-	-
Серія 2	+	-	-	-
Серія 3	-	+	-	-
Серія 4	+	+	-	-
Серія 5	-	-	+	-
Серія 6	+	-	+	-
Серія 7	-	+	+	-
Серія 8	+	+	+	-
Серія 9	-	-	-	+
Серія 10	+	-	-	+
Серія 11	-	+	-	+
Серія 12	+	+	-	+
Серія 13	-	-	+	+
Серія 14	+	-	+	+
Серія 15	-	+	+	+
Серія 16	+	+	+	+

При проведенні експерименту обґрунтовуємо інтервали варіювання вхідних факторів для трьох груп, перша група це маленькі підприємства які займаються міжнародними перевезеннями з кількістю автомобілів від 1 до 10 од., друга умова середні підприємства з кількістю автомобілів від 10 до 100 од., третя умова великі підприємства з кількістю автомобілів від 100 од. Вхідні параметри при різних рівнях варіювання факторів представлені у таблиці 4.12.

Таблиця 4.12 – Рівні варіювання факторів

Параметр	Мінімальне значення	Максимальне значення
Перша група		
Інтенсивність надходження заявок за добу, од.	10	50
Середній обсяг одного замовлення, т	0,1	1
Кількість відправників вантажу, од.	5	10
Кількість одержувачів вантажу, од.	5	10
Друга група		
Інтенсивність надходження заявок за добу, од.	50	100
Середній обсяг одного замовлення, т	0,5	10
Кількість відправників вантажу, од.	25	50
Кількість одержувачів вантажу, од.	25	50
Третя група		
Інтенсивність надходження заявок за добу, од.	100	300
Середній обсяг одного замовлення, т	0,5	10
Кількість відправників вантажу, од.	50	100
Кількість одержувачів вантажу, од.	50	100

Розрахувавши математичну модель у 16 серіях дослідів було отримано значення загальних витрат на доставку вантажів. Результати моделювання наведено для першої групи та чотирьох схем у таблиці 4.13.

Таблиця 4.13 – Результати проведення розрахунків

Серія дослідів	Рівні варіювання				Загальні витрати на доставку, грн
	Перша група				
	Інтенсивність надходження заявок за добу, од.	Середній обсяг одного замовлення, т	Кількість відправників вантажу, од.	Кількість одержувачів вантажу, од.	
1	2	3	4	5	6
Схема 1					
Серія 1	10	0,1	5	5	114000
Серія 2	50	0,1	5	5	570000
Серія 3	10	1	5	5	96500
Серія 4	50	1	5	5	235000
Серія 5	10	0,1	10	5	171000
Серія 6	50	0,1	10	5	855000
Серія 7	10	1	10	5	144750
Серія 8	50	1	10	5	352500
Серія 9	10	0,1	5	10	173500
Серія 10	50	0,1	5	10	857500
Серія 11	10	1	5	10	99000
Серія 12	50	1	5	10	350000
Серія 13	10	0,1	10	10	173500
Серія 14	50	0,1	10	10	857500
Серія 15	10	1	10	10	100000
Серія 16	50	1	10	10	351000
Схема 2					
Серія 1	10	0,1	5	5	104000
Серія 2	50	0,1	5	5	520000
Серія 3	10	1	5	5	134000
Серія 4	50	1	5	5	235000
Серія 5	10	0,1	10	5	156000
Серія 6	50	0,1	10	5	780000
Серія 7	10	1	10	5	201000
Серія 8	50	1	10	5	352500
Серія 9	10	0,1	5	10	107000
Серія 10	50	0,1	5	10	523000
Серія 11	10	1	5	10	137000
Серія 12	50	1	5	10	238000
Серія 13	10	0,1	10	10	159000
Серія 14	50	0,1	10	10	783000
Серія 15	10	1	10	10	204000
Серія 16	50	1	10	10	355500

Продовження таблиці 4.13

Схема 3					
Серія 1	10	0,1	10	10	120640
Серія 2	50	0,1	10	10	598000
Серія 3	10	1	10	10	156780
Серія 4	50	1	10	10	277300
Серія 5	10	0,1	50	10	182520
Серія 6	50	0,1	50	10	897000
Серія 7	10	1	50	10	235170
Серія 8	50	1	50	10	408900
Серія 9	10	0,1	10	50	128400
Серія 10	50	0,1	10	50	617140
Серія 11	10	1	10	50	164400
Серія 12	50	1	10	50	283220
Серія 13	10	0,1	50	50	186030
Серія 14	50	0,1	50	50	931770
Серія 15	10	1	50	50	244800
Серія 16	50	1	50	50	408825
Схема 4					
Серія 1	10	0,1	10	10	96720
Серія 2	50	0,1	10	10	494000
Серія 3	10	1	10	10	127300
Серія 4	50	1	10	10	220900
Серія 5	10	0,1	50	10	146640
Серія 6	50	0,1	50	10	725400
Серія 7	10	1	50	10	190950
Серія 8	50	1	50	10	327825
Серія 9	10	0,1	10	50	100580
Серія 10	50	0,1	10	50	486390
Серія 11	10	1	10	50	127410
Серія 12	50	1	10	50	223720
Серія 13	10	0,1	50	50	147870
Серія 14	50	0,1	50	50	743850
Серія 15	10	1	50	50	193800
Серія 16	50	1	50	50	334170

Серед методів опрацювання даних для вивчення імовірнісних зв'язків широко застосовується регресійний аналіз. Він передбачає послідовне виконання кроків: спочатку визначається форма рівняння, що описує залежність, потім оцінюються його параметри на основі статистичних даних, і наостанок проводиться перевірка статистичних гіпотез щодо побудованої

регресії. У випадку аналізу впливу декількох факторів (багатофакторний регресійний аналіз) стає можливим кількісно оцінити, наскільки кожен фактор окремо впливає на досліджуваний показник, припускаючи, що інші фактори не змінюються відносно свого середнього значення. Важливою передумовою для застосування такого аналізу є відсутність детермінованої залежності між самими факторами. Для побудови моделі скористуємося табличним процесором Microsoft Excel, в якій є вбудована програма для розрахунку регресії. Регресійний аналіз було проведено для кожної групи, оцінка якості регресійних моделей здійснюється за показником R-квадрат (міра визначеності). Він характеризує ступінь відповідності моделі вихідним даним. Високе значення R-квадрат (близьке до 1) свідчить про те, що модель успішно пояснює значну частину варіабельності досліджуваної змінної.

В таблиці 4.14 представлено результати регресійного аналізу для першої групи умов по першій схемі. Серед перевірених результатів найбільш доцільною виявилася показова регресійна модель.

Таблиця 4.14 – Результати регресійного аналізу для першої групи

Значення коефіцієнтів рівняння регресії	Гіпотези про вид регресійної моделі		
	Лінійна	Ступенева	Показова
a_0	-432675,3	10,2	11,2
a_1	18048,4	0,79	0,03
a_2	501597,2	0,37	0,94
a_3	0	0	0
a_4	0	0	0
Значення коефіцієнту детермінації	0,931	0,931	0,945

Аналогічно проводимо регресійний аналіз для інших груп варіювання. Результати показали що найбільш значимою виявилася показова регресійна модель, так як значення коефіцієнту детермінації найвище серед інших регресійних моделей.

За підсумками перевірки гіпотез виведено регресійні моделі, що встановлюють зв'язок між загальними витратами на доставку та інтенсивністю надходження заявок за добу, середнього обсягу одного замовлення та кількості відправників та одержувачів вантажу за чотирма схемами доставки для трьох груп.

$$\begin{aligned}
 V_{заг}^{1.1} &= 77806,9 \cdot 1,03^{X_1} \cdot 1,4^{X_2}, \\
 V_{заг}^{1.2} &= 61395,7 \cdot 1,02^{X_1} \cdot 1,3^{X_2} \cdot 1,08^{X_3}, \\
 V_{заг}^{1.3} &= 74887,7 \cdot 1,02^{X_1} \cdot 1,3^{X_2} \cdot 1,06^{X_4}, \\
 V_{заг}^{1.4} &= 60788,8 \cdot 1,02^{X_1} \cdot 1,3^{X_2} \cdot 1,08^{X_3} \cdot 1,02^{X_4}.
 \end{aligned}
 \tag{4.9}$$

$$\begin{aligned}
 V_{заг}^{2.1} &= 16251,7 \cdot 1,03^{X_1} \cdot 1,26^{X_2}, \\
 V_{заг}^{2.2} &= 6768,7 \cdot 1,02^{X_1} \cdot 1,26^{X_2} \cdot 1,07^{X_3}, \\
 V_{заг}^{2.3} &= 17778,5 \cdot 1,01^{X_1} \cdot 1,29^{X_2} \cdot 1,05^{X_4}, \\
 V_{заг}^{2.4} &= 4660,5 \cdot 1,02^{X_1} \cdot 1,3^{X_2} \cdot 1,07^{X_3} \cdot 1,02^{X_4}.
 \end{aligned}
 \tag{4.10}$$

$$\begin{aligned}
 V_{заг}^{3.1} &= 6854,4 \cdot 1,02^{X_1} \cdot 1,26^{X_2}, \\
 V_{заг}^{3.2} &= 6904,5 \cdot 1,013^{X_1} \cdot 1,2^{X_2} \cdot 1,03^{X_3}, \\
 V_{заг}^{3.3} &= 16879,6 \cdot 1,01^{X_1} \cdot 1,2^{X_2} \cdot 1,02^{X_4}, \\
 V_{заг}^{3.4} &= 6966,4 \cdot 1,009^{X_1} \cdot 1,26^{X_2} \cdot 1,03^{X_3} \cdot 1,01^{X_4}.
 \end{aligned}
 \tag{4.11}$$

Для підтвердження статистичної значущості отриманих регресійних моделей (4.9)–(4.11) та перевірки гіпотези про адекватність їх опису експериментальних даних було застосовано F-критерій Фішера. Перевірка здійснювалася шляхом порівняння розрахункового значення критерію $F_{розр}$, отриманого на основі коефіцієнта детермінації R^2 , з табличним критичним значенням $F_{табл}$ для рівня значущості $\alpha = 0,05$ та відповідних ступенів свободи. Результати перевірки адекватності розроблених моделей

наведені в таблиці 4.15. Розрахунки виконані в MS Excel за допомогою вбудованого пакету «Аналіз даних» (Data Analysis Toolpak).

Таблиця 4.15 – Результати перевірки адекватності розроблених регресійних моделей за критерієм Фішера

Група умов	Схема доставки	Тип моделі	Коефіцієнт детермінації	Розрахункове значення F-критерію	Табличне значення F-критерію
1 група	Схема 1	Показова	0,945	47,25	3,36
	Схема 2	Показова	0,952	54,54	3,36
	Схема 3	Показова	0,938	41,61	3,36
	Схема 4	Показова	0,941	43,84	3,36
2 група	Схема 1	Показова	0,935	39,56	3,36
	Схема 2	Показова	0,948	50,13	3,36
	Схема 3	Показова	0,955	58,36	3,36
	Схема 4	Показова	0,932	37,69	3,36
3 група	Схема 1	Показова	0,94	43,08	3,36
	Схема 2	Показова	0,95	52,25	3,36
	Схема 3	Показова	0,961	67,76	3,36
	Схема 4	Показова	0,944	46,39	3,36

За результатами розрахунків можливо зазначити, що отримані моделі є адекватними.

Для поглибленого розуміння характеру впливу основних керуючих факторів на загальні витрати на доставку (Y) було проведено візуальний аналіз за допомогою діаграми поверхні відгуку (рис. 4.8) та діаграм паралельних координат (рис. 4.9 – 4.11).

Досліджувалися такі входні фактори: інтенсивність надходження заявок за добу (X1), середній обсяг одного замовлення (X2), кількість відправників вантажу (X3) та кількість одержувачів вантажу (X4). Діаграми паралельних координат дозволили одночасно візуалізувати значення всіх факторів для кожного спостереження (серії дослідів), де кожна лінія представляла окремий експеримент, а її колір відповідав рівню загальних витрат. Діаграма поверхні відгуку наочно продемонструвала залежність витрат від двох факторів (X1 та X2) та їх взаємодію.

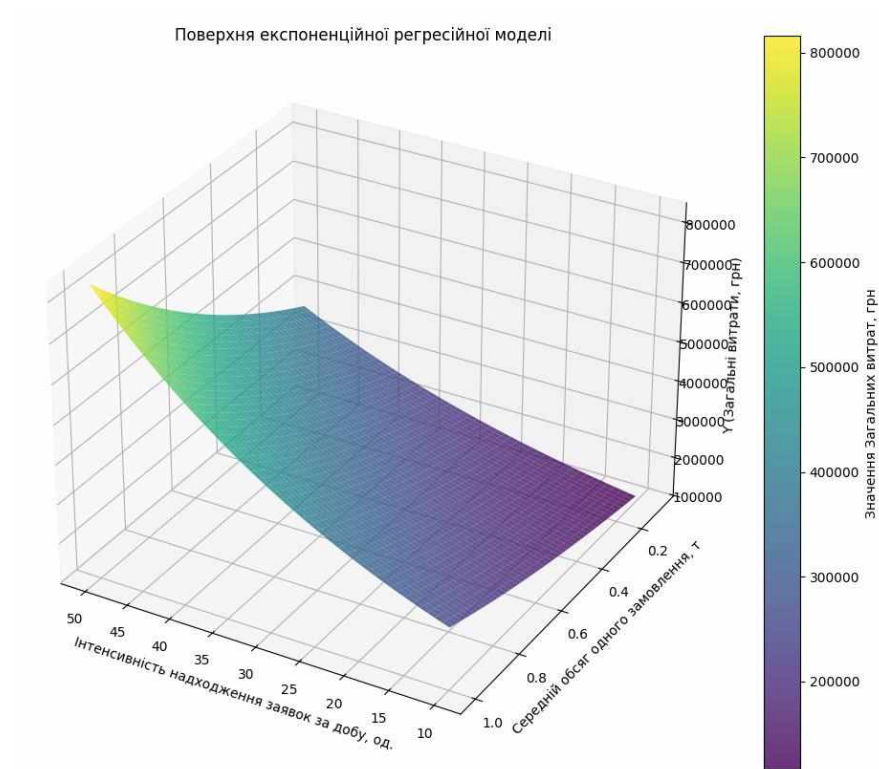


Рисунок 4.8 – Поверхня відгуку залежності витрат від інтенсивності надходження заявок та середнього обсягу замовлення

Діаграма паралельних координат

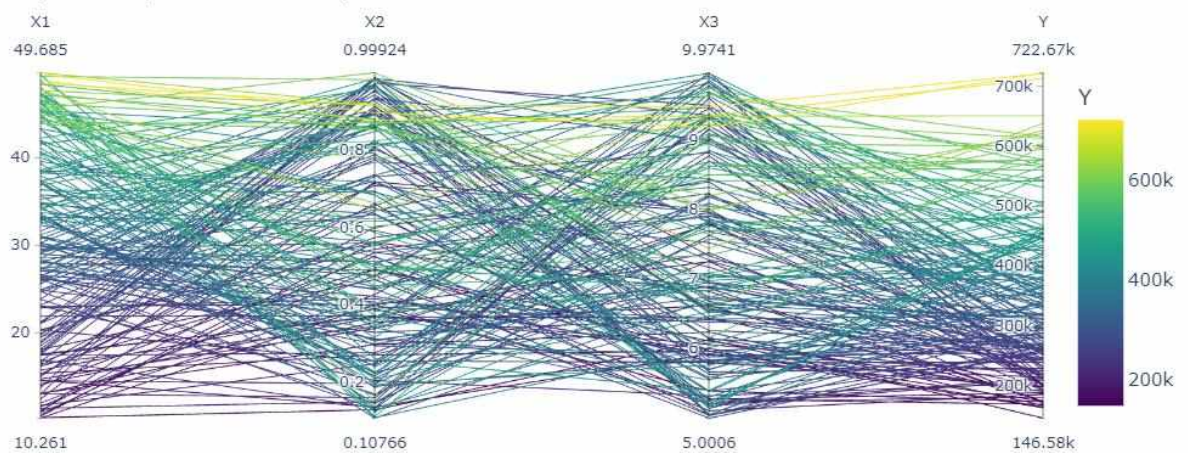


Рисунок 4.9 – Діаграма паралельних координат впливу інтенсивності заявок, середнього обсягу замовлення та кількості відправників на загальні витрати доставки

Діаграма паралельних координат

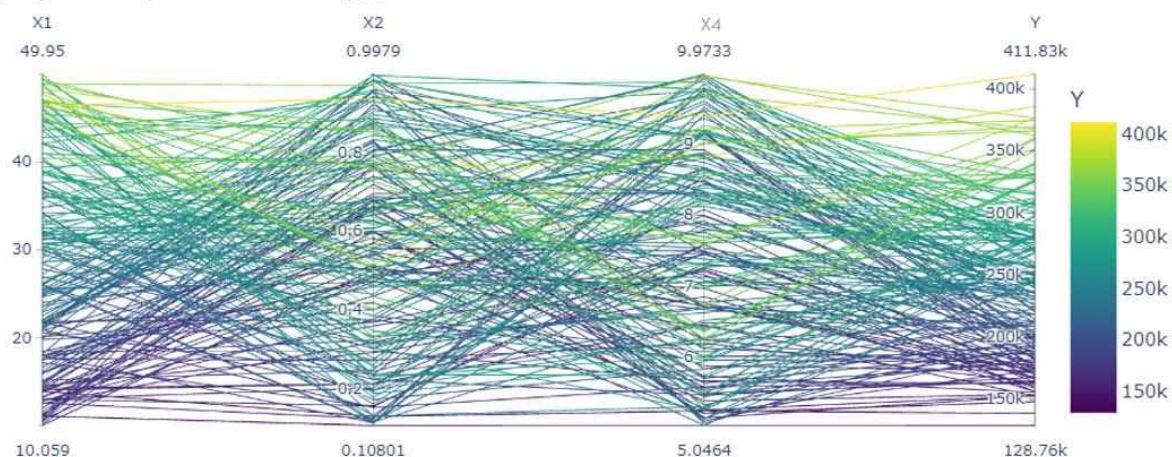


Рисунок 4.10 – Діаграма паралельних координат впливу інтенсивності заявок, середнього обсягу замовлення та кількості одержувачів вантажу на загальні витрати доставки

Діаграма паралельних координат

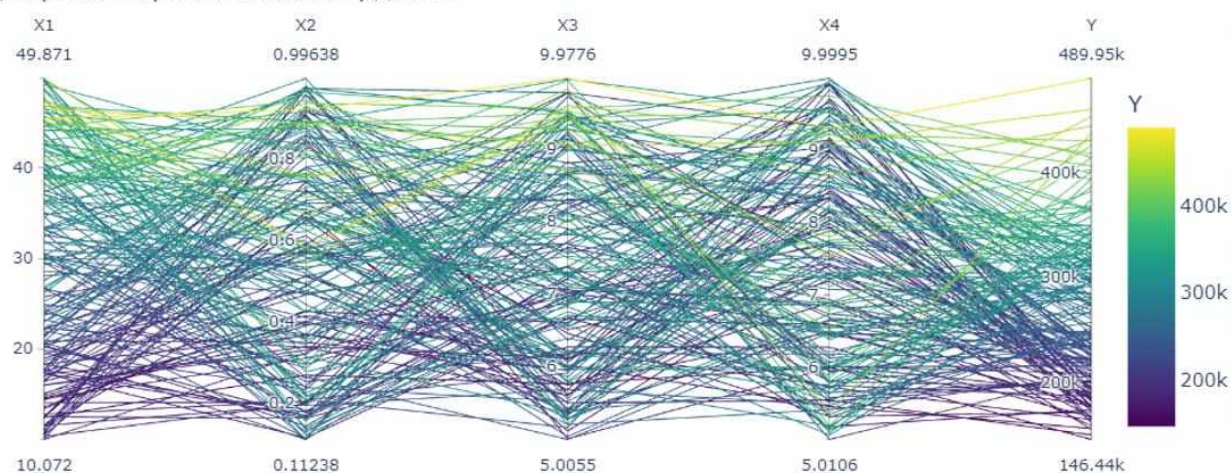


Рисунок 4.11 – Діаграма паралельних координат впливу інтенсивності заявок, середнього обсягу замовлення, кількості відправників та кількості одержувачів вантажу на загальні витрати доставки

Аналіз представлених графічних матеріалів дозволив виявити стійкі тенденції. Усі чотири досліджувані фактори (X1,X2,X3,X4) загалом демонструють позитивний вплив на рівень загальних витрат на доставку. Це означає, що зі збільшенням інтенсивності надходження заявок, середнього обсягу одного замовлення, кількості відправників або кількості одержувачів

вантажу, як правило, спостерігається зростання загальних витрат на перевезення.

Особливо важливим є комбінований вплив досліджуваних факторів. Візуальний аналіз усіх діаграм свідчить, що найвищі рівні загальних витрат досягаються за умови одночасно високих значень декількох або всіх керуючих факторів. І навпаки, найнижчі витрати спостерігаються при комбінації низьких значень факторів. Характерне для діаграм паралельних координат переплетення ліній, а також кривина поверхні відгуку на тривимірній діаграмі, вказують на наявність взаємодії між факторами. Це означає, що ефект одного фактора може посилюватися або послаблюватися залежно від рівнів інших факторів, що підкреслює складність системи та необхідність врахування синергетичних ефектів при плануванні та оптимізації міжнародних перевезень.

На рисунках представлено залежність загальних витрат від середнього обсягу одного замовлення за умови що інтенсивність надходження заявок на добу дорівнює 30 од. (рис. 4.12) та інтенсивності надходження заявки на добу за умови що середній обсяг одного замовлення дорівнює 0,5 т (рис.4.13), кількість відправників та отримувачів дорівнює 5, для першої групи по чотирьом схемам. По наведеним гістограмам можемо зробити висновок що схема два, яка базується на використанні логістичного центру в країні відправлення має менший показник загальних витрат в порівнянні з іншими схемами, це пов'язано з укрупненням дрібних партій вантажу в межах логістичного центру країни відправлення, оптимізації завантаження транспортних засобів, ефективного застосування технології крос-докінгу в країні відправлення сприяє мінімізації часових та фінансових витрат, пов'язаних із проміжним зберіганням та внутрішньо складською обробкою вантажів, дозволяє оптимізувати параметри магістрального перевезення.

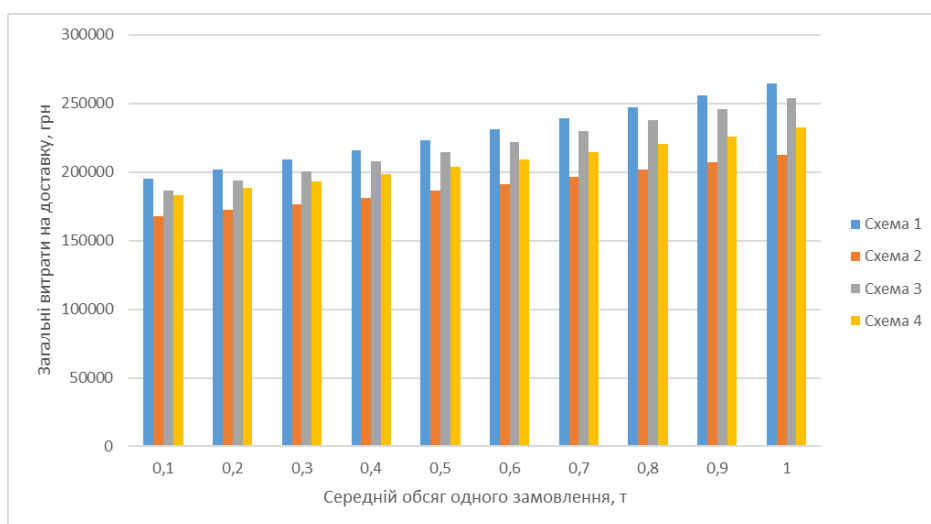


Рисунок 4.12 – Залежність загальних витрат від середнього обсягу одного замовлення для першої групи умов

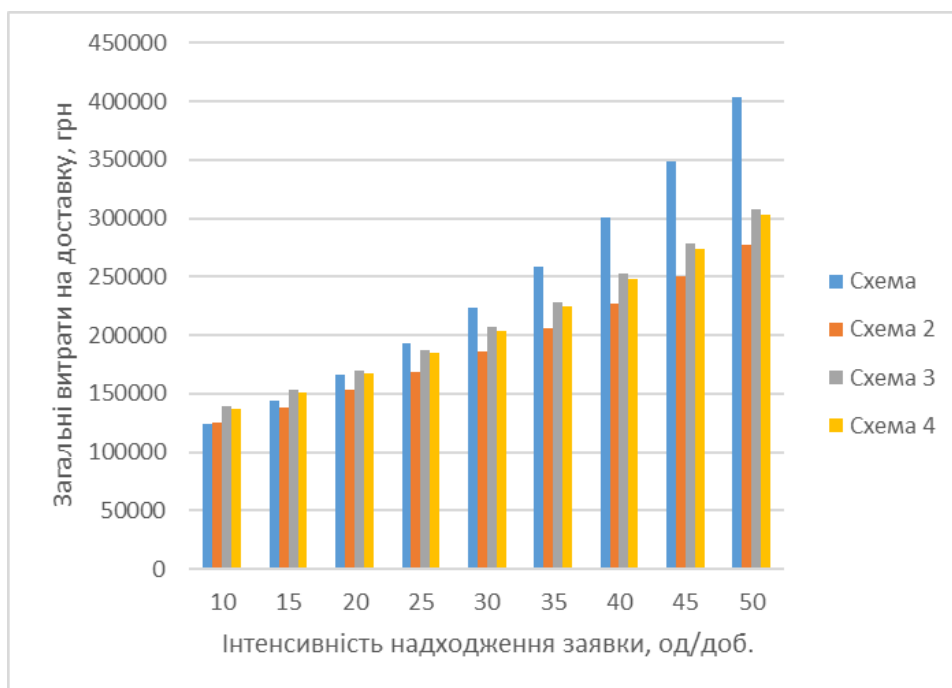


Рисунок 4.13 – Залежність загальних витрат від інтенсивності надходження заявки на добу для першої групи умов

На рисунках представлено залежність загальних витрат від середнього обсягу одного замовлення за умови, що інтенсивність надходження заявок на добу дорівнює 75 од. (рис. 4.14) та інтенсивності надходження заявки на добу при середньому обсязі одного замовлення 5 т (рис.4.15), для другої групи по чотирьом схемам. Аналіз гістограм дозволяє стверджувати що при

інтенсивності надходження заявок 75 од./добу до середнього обсягу 6,5 т ефективнішою є схема три. Це свідчить про те, що при значному щоденному числі відправлень, навіть якщо окремі замовлення не є надто великими за обсягом, ефективна організація кінцевого етапу доставки вигідніше, в порівнянні зі схеми з попередньою консолідацією в країні відправлення (Схеми 2 та 4), які за таких умов стають значно дорожчими, особливо при зростанні середнього обсягу замовлення, це пов'язано з операційними витратами логістичних центрів на обробку вже значного сукупного добового обсягу. При середньому обсягу одного замовлення від 7,5 т ефективною є схема 1 (пряма доставка), для значних за обсягом партій вантажів, що відправляються з помірною інтенсивністю, пряма схема є найефективнішим способом доставки з мінімальними витратами.

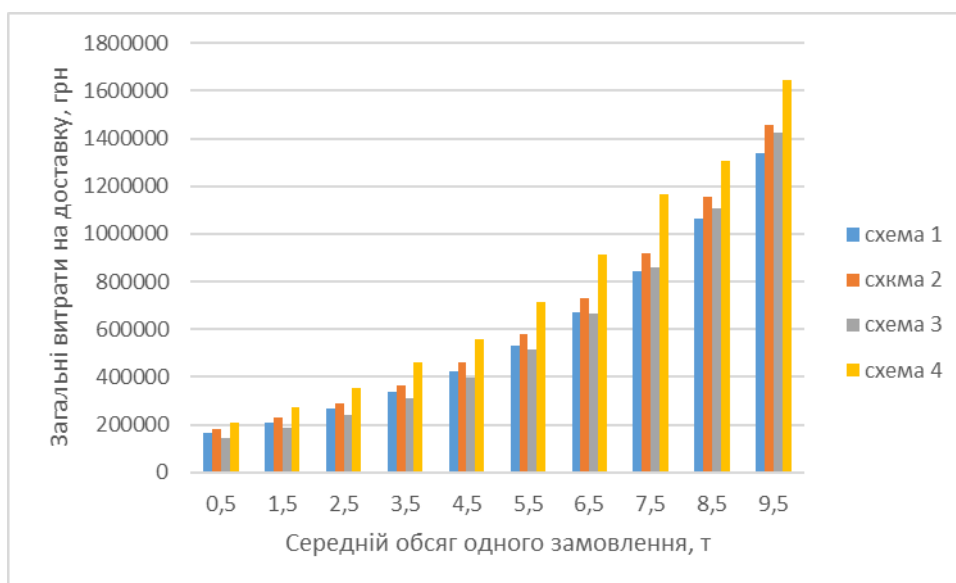


Рисунок 4.14 – Залежність загальних витрат від середнього обсягу одного замовлення для другої групи умов

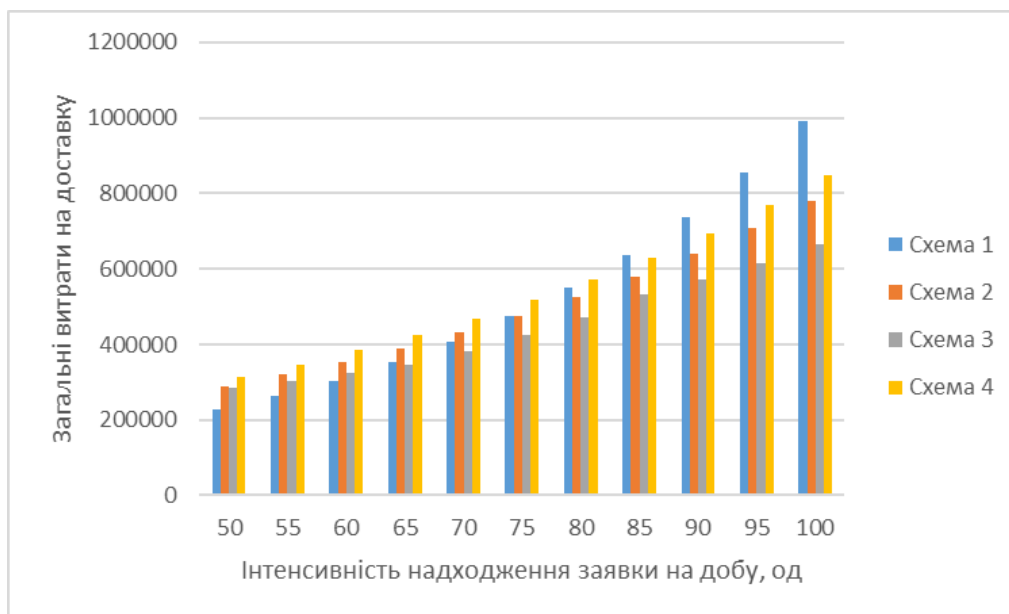


Рисунок 4.15 – Залежність загальних витрат від інтенсивності надходження заявки на добу для другої групи умов

На рисунках представлено залежність загальних витрат від середнього обсягу одного замовлення, за умови що інтенсивність надходження заявок на добу дорівнює 150 од. (рис. 4.16), та інтенсивності надходження заявки на добу при середньому обсязі одного замовлення 5 т (рис.4.17), для третьої групи по чотирьом схемам. На основі аналізу представленої гістограми можемо зробити висновок що схема 4 ефективна коли середній обсяг одного замовлення не перевищує 1,5 т, це обумовлено тим що при високій інтенсивності надходження заявки та незначних обсягів замовлення загальні витрати зменшуються за рахунок консолідації та деконсолідації. При збільшенні середнього обсягу одного замовлення від 1,5 до 9,5 т третя схема дає найменший показник загальних витрат на доставку за рахунок значного обсягу замовлення що дозволяє одразу доставляти вантаж магістральним транспортом без залучення логістичного центру для консолідації. За умов значного середнього обсягу одного замовлення (5 т) та високої інтенсивності надходження заявок (100-200 од./добу), схема 3 однозначно є найбільш економічно ефективною.

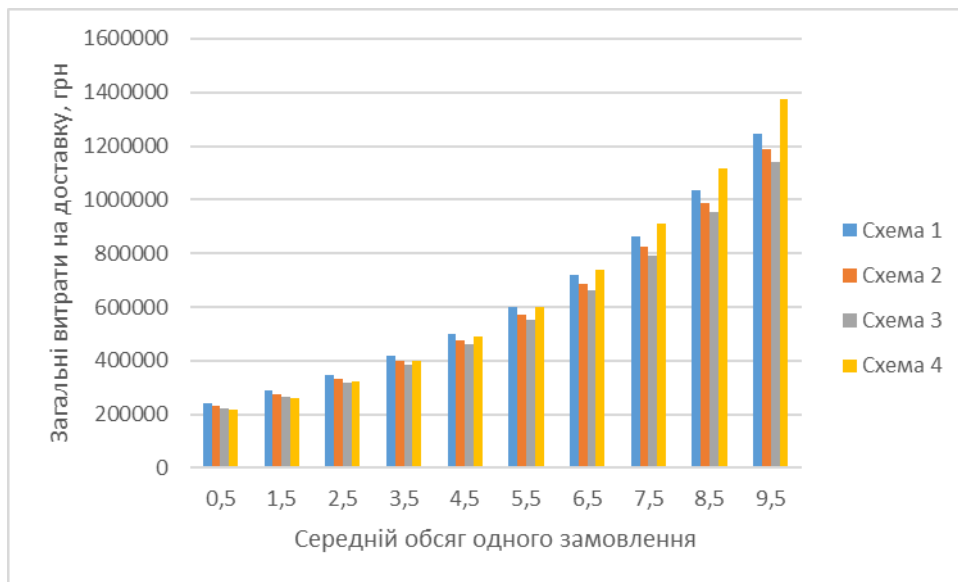


Рисунок 4.16 – Залежність загальних витрат від середнього обсягу одного замовлення для третьої групи умов

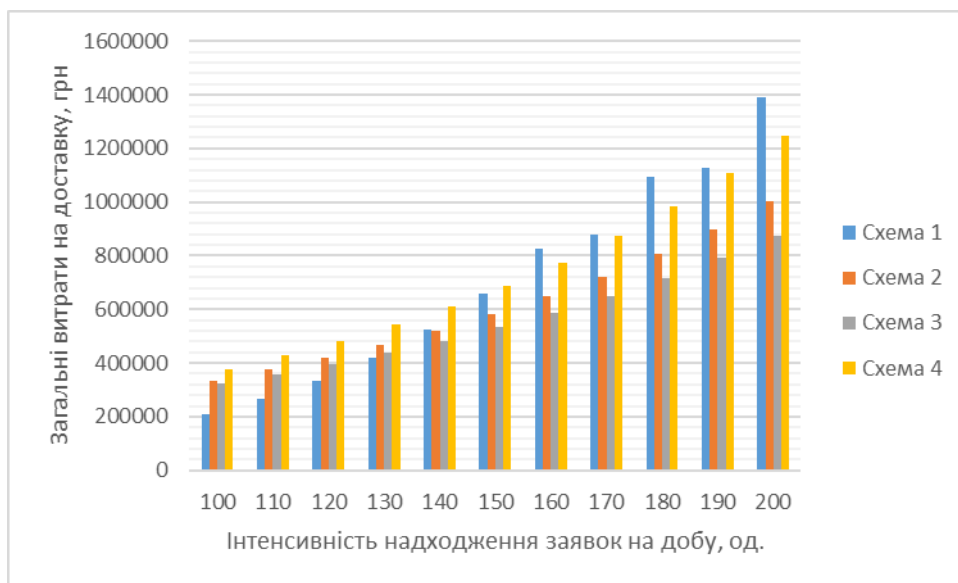


Рисунок 4.17 – Залежність загальних витрат від інтенсивності надходження заявки на добу для третьої групи умов

4.4 Розробка практичних рекомендацій з оптимізації логістичних процесів

Наукова важливість результатів цієї роботи в контексті діджиталізації полягає у створенні методологічного мосту між теоретичною логістикою та

реальною операційною діяльністю в умовах екстремальної невизначеності.

Необхідність впровадження діджитал-технологій, визначає важливість впровадження прикладного наукового інструментарію, який трансформує абстрактні поняття «ефективність» та «ризик» у конкретні, вимірювані показники. В умовах воєнного стану та євроінтеграції ці результати набувають критичного значення, оскільки дозволяють перейти від реактивного управління до проактивного планування на основі даних.

У роботі діджиталізація розглядається не просто як перехід на електронний документообіг, а як комплексна трансформація логістичних процесів, спрямована на створення єдиного інформаційного простору для всіх учасників ланцюга поставок.

Основні аспекти діджиталізації в роботі – використання IoT, хмарних сервісів, блокчейну та Big Data для моніторингу та управління. Заміна паперових накладних електронними, що забезпечує юридичну значущість, швидкість обміну даними та прозорість. Автоматизація рішень – використання програмних алгоритмів для планування маршрутів, управління складом та синхронізації процесів (крос-докінгу). Можливість відстежувати вантаж та стан виконання замовлення в реальному часі.

Розроблені власні програмні інструменти (цифрові рішення), які є практичним втіленням діджиталізації в дисертації. Діджиталізація в роботі безпосередньо впливає на зменшення конкретних складових у формулі загальних логістичних витрат. Це показано через математичні залежності та результати моделювання. Вплив на структуру витрат представлено в таблиці 4.16.

Таблиця 4.16 – Вплив запропонованих інструментів діджиталізації на складові функції загальних витрат

Складова витрат	Інструмент діджиталізації
Витрати на оформлення документів	Перехід на e-CMR та автоматизація заявок зменшує вартість обробки одного документа та скорочує час оформлення
Витрати на простої	За рахунок використання «Симулятора Крос-Докінгу» та узгодженим графікам мінімізується час очікування автомобілів та простою доків
Митні витрати	Використання системи NCTS та електронної митниці скорочує час проходження кордону та ризики корупційних затримок, що опосередковано знижує витрати
Військові ризики	Використання цифрового «індексу динамічної вразливості» дозволяє обрати маршрут з меншою ймовірністю втрати вантажу, навіть якщо він довший, що оптимізує математичне очікування збитків
Операційні витрати складу	Програма дозволяє визначити оптимальну кількість персоналу та техніки (конфігурацію ресурсів), уникаючи витрат на утримання зайвих ресурсів або штрафів за затримки

Визначення єдиної оптимальної точки ρ^* є важливим аналітичним результатом, для практичного застосування більш корисним є поняття «оптимальної робочої зони». Крім того, будь-яке оптимальне рішення залежить від вихідних припущень моделі, зокрема, від рівня стохастичності процесів. Тому для розробки надійних рекомендацій необхідно провести аналіз чутливості рішення до зміни цих припущень.

Як було зазначено раніше, форма кривої сумарних витрат має велике значення. Якщо в околі мінімуму крива є пологою, це означає, що невеликі відхилення від ρ^* не призводять до значного зростання витрат. Це дозволяє визначити оптимальну робочу зону – діапазон значень ρ , в межах якого сумарні витрати не перевищують мінімальні більш ніж на прийнятну величину (наприклад, на 5 %). Наявність такої зони надає диспетчеру операційну гнучкість: він може обирати будь-яке значення ρ в межах цієї зони, не ризикуючи суттєво погіршити економічні показники. Це особливо

важливо в динамічних умовах, де точне дотримання єдиного значення може бути ускладненим. Наприклад, для даних з таблиці 4.2, мінімальні витрати 1810 грн досягаються при $\rho=0,92$. Витрати при $\rho=0,90$ (1880 грн) та $\rho=0,93$ (1900 грн) перевищують мінімальні менш ніж на 5 %. Таким чином, діапазон $[0,90, 0,93]$ можна вважати оптимальною робочою зоною.

Оптимальний рівень завантаження ρ^* був знайдений для певного (базового) рівня стохастичності системи, що характеризується заданими стандартними відхиленнями часу руху та обслуговування. Однак у реальному житті рівень невизначеності може змінюватися. Наприклад, у нічний час рух є більш стабільним, ніж у години пік; за сприятливих погодних умов відхилення менші, ніж під час снігопаду. Надійне рішення повинно залишатися ефективним за різних умов.

Для перевірки надійності знайденого рішення та розробки адаптивних стратегій було проведено аналіз чутливості. Імітаційний експеримент було повторено для трьох сценаріїв рівня стохастичності зовнішнього середовища:

- сценарій низької стохастичності: стандартні відхилення параметрів часу руху та обслуговування зменшено на 50 % від базового рівня;
- базовий сценарій: вихідні параметри, використані в основному експерименті;
- сценарій високої стохастичності: стандартні відхилення параметрів часу руху та обслуговування збільшено на 50 % від базового рівня.

Для кожного сценарію було заново визначено оптимальний рівень завантаження ρ^* та відповідну оптимальну робочу зону. Результати аналізу зведені в таблицю 4.17.

Таблиця 4.17 – Результати аналізу чутливості оптимального рівня завантаження до рівня стохастичності системи

Рівень стохастичності	Оптимальний рівень завантаження	Мінімальні сумарні витрати, грн,	Оптимальна робоча зона	Робастність при оптимальному рівні завантаження, %
Низький	0,95	1450	[0,93, 0,96]	98
Базовий	0,92	1810	[0,90, 0,93]	95
Високий	0,87	2550	[0,85, 0,89]	94

Аналіз результатів, наведених у таблиці 4.17, дозволяє зробити ключовий висновок: оптимальний рівень завантаження не є статичною константою, а залежить від рівня невизначеності в системі. В умовах низької стохастичності (стабільне середовище) система може працювати з дуже високим рівнем завантаження ($\rho^*=0,95$), оскільки ризик виникнення значних відхилень є малим. Навпаки, в умовах високої стохастичності (нестабільне середовище) оптимальна стратегія вимагає значного зниження рівня завантаження до $\rho^*=0,87$. Це означає, що система повинна свідомо створювати більші часові буфери для поглинання значних випадкових збурень. Спроба працювати з високим завантаженням у таких умовах призвела б до колапсу системи та катастрофічного зростання витрат.

Оптимальний рівень завантаження ρ не повинен бути фіксованим параметром, закладеним у систему раз і назавжди. Натомість, він має бути динамічною керованою політикою. Це означає перехід від статичного планування до адаптивного управління. Логістична система повинна мати можливість оцінювати поточний або прогнозований рівень стохастичності (на основі часу доби, прогнозу погоди, даних про затори) і відповідно коригувати цільовий рівень завантаження НРМ. Результати аналізу чутливості можуть бути використані для створення простої таблиці рішень для диспетчера. Такий підхід перетворює імітаційну модель зі стратегічного інструменту одноразового аналізу на тактичну систему підтримки операційних рішень, що значно підвищує її практичну цінність.

На основі проведеного імітаційного дослідження та аналізу його результатів можна сформулювати низку практичних рекомендацій, спрямованих на підвищення ефективності функціонування транспортно-логістичної системи через оптимізацію завантаження НРМ:

1. Встановлення базових показників. Першим кроком для будь-якого вдосконалення є розуміння поточної ситуації. Рекомендується використовувати розроблену імітаційну модель для аналізу історичних даних про роботу системи. Це дозволить визначити фактичний середній рівень завантаження НРМ, з яким компанія працює на даний момент, та оцінити відповідні йому середні витрати від простоїв, рівень робасності. Отримані показники стануть точкою відліку, відносно якої можна буде оцінювати ефект від впровадження змін.

2. Впровадження оптимальної робочої зони. Замість прагнення до одного жорсткого значення, рекомендується впровадити в практику планування поняття «оптимальної робочої зони» для рівня завантаження ρ . Диспетчери та планувальники мають складати графіки прибуття автомобілів таким чином, щоб планове завантаження НРМ знаходилося в межах цього діапазону (наприклад, від 90 % до 93 % для базових умов). Це вимагає свідомого включення до графіка обґрунтованих часових резервів (запланованих простоїв), які не є втратами, а інструментом забезпечення стабільності.

3. Розробка та застосування адаптивної політики управління. Результати аналізу чутливості показали, що оптимальна стратегія залежить від зовнішніх умов. Тому ключовою рекомендацією є перехід від статичного до адаптивного управління завантаженням. На основі досліджень розроблено політику ухвалення рішень для оперативного персоналу. Ця політика представлена у таблиці 4.18.

Таблиця 4.18 – Матриця ухвалення рішень для оперативного управління завантаженням НРМ

Режим	Рівень стохастичності	Цільова зона завантаження	Стратегічна мета
«Зелений»	Низький: нічний час, вихідні, сприятливі погодні та дорожні умови	[0,93; 0,96]	Максимізація економічної ефективності та пропускну здатності
«Жовтий»	Базовий: стандартний робочий день, типові умови трафіку	[0,90; 0,93]	Досягнення оптимального балансу між витратами та робастністю
«Червоний»	Високий: години пік, погана погода, повідомлення про затори або ДТП	[0,85; 0,89]	Пріоритет стабільності та робастності, мінімізація ризику збоїв

4. Створення циклу безперервного вдосконалення. Логістичне середовище є динамічним: змінюються обсяги перевезень, маршрути, стан доріг, вимоги клієнтів. Тому процес оптимізації не повинен бути одноразовою дією. Рекомендується впровадити цикл безперервного вдосконалення:

5. Розширення методології на інші елементи системи. Підхід, що полягає у використанні імітаційного моделювання для пошуку оптимального балансу між використанням ресурсів (завантаженням) та створенням резервів для поглинання невизначеності, може і повинен бути застосований до інших потенційних «вузьких місць» у ланцюгу постачання. Це можуть бути складські операції (комплектация замовлень), робота крос-докінгових терміналів, виробничі лінії або будь-які інші процеси, де взаємодіють потоки та обмежені ресурси.

На основі проведеного імітаційного дослідження можна сформулювати низку практичних рекомендацій для підвищення ефективності функціонування крос-докінгового терміналу:

1. Встановлення базових показників. Першим кроком є використання розробленої імітаційної моделі для аналізу існуючої конфігурації ресурсів на підприємстві. Це дозволить визначити фактичне «вузьке місце» системи, оцінити відповідні йому середні витрати від простоїв транспорту, персоналу та техніки. Отримані показники стануть точкою відліку для обґрунтування інвестицій та оцінки ефекту від впровадження змін.

2. Розробка та застосування адаптивної інвестиційної політики. Результати аналізу показали, що оптимальна стратегія залежить від балансу ресурсів. Ключовою рекомендацією є перехід від статичного до адаптивного управління потужностями. На основі дослідження розроблено політику ухвалення рішень для операційного менеджменту, яка представлена у таблиці 4.19.

Таблиця 4.19 – Матриця ухвалення рішень для управління ресурсами терміналу

Режим	Обмеження (вузьке місце)	Цільова дія	Стратегічна мета
«Оптимізація»	Система збалансована (наприклад, 5/10/5), але є запізнення	Аналіз зовнішніх факторів, графік прибуття, пріоритезація (FIFO vs пріоритет)	Досягнення оптимального балансу між витратами та робастністю
«Розширення»	Дефіцит інфраструктури (доків)	Інвестиції у нові доки з одночасним плануванням найму персоналу та закупівлі техніки	Максимізація пропускної здатності при збереженні балансу
«Рекрутинг»	Дефіцит персоналу	Пріоритетний найм та навчання робітників	Мінімізація простою дорогої інфраструктури та техніки
«Модернізація»	Дефіцит техніки	Закупівля або лізинг додаткової техніки	Забезпечення повної продуктивності персоналу та інфраструктури

3. Створення циклу безперервного вдосконалення. Логістичне середовище є динамічним: змінюються обсяги вантажопотоків, графіки руху, вимоги клієнтів. Процес оптимізації не повинен бути одноразовою дією. Рекомендується впровадити цикл: періодичний збір актуальних даних → оновлення параметрів імітаційної моделі → перевірка поточної конфігурації на збалансованість → коригування ресурсної політики.

4. Розширення методології на інші елементи системи. Підхід, що полягає у використанні імітаційного моделювання для пошуку збалансованої конфігурації ресурсів з метою усунення «вузьких місць», може бути застосований і до інших процесів у ланцюгу постачання: складські операції, робота митних терміналів, міська дистрибуція та інші процеси, де взаємодіють потоки та обмежені ресурси.

Вибір оптимальної архітектури логістичної мережі є фундаментальним стратегічним рішенням, що визначає довгострокову структуру витрат та рівень сервісу компанії. Результати дисертаційного дослідження переконливо доводять, що універсального, «найкращого» рішення не існує. Натомість, найбільш економічно доцільна модель організації перевезень залежить від розміру діяльності підприємства та специфічних характеристик його вантажопотоків.

Підприємствам, що характеризуються невисокою інтенсивністю вантажопотоків, великою кількістю відправників та відносно малим середнім обсягом замовлення (типовий LTL-сегмент), слід пріоритетно впроваджувати схему 2 (консолідація в країні відправлення). Аналіз результатів попарного порівняння витрат для першої групи умов (малі підприємства) демонструє беззаперечну економічну перевагу даної схеми. Впровадження консолідації в країні відправлення дозволяє досягти зниження загальних витрат на 16,63 % у порівнянні з прямою доставкою (схема 1) та на 9,98 % у порівнянні зі схемою, що передбачає деконсолідацію в країні призначення (схема 3).

Економічна логіка цієї переваги полягає у вирішенні ключової проблеми малих перевізників: невідповідності між фрагментованою

структурою попиту (багато дрібних замовлень) та необхідністю забезпечення високого коефіцієнта використання вантажопідйомності на довгому та дорогому міжнародному маршруті. Прямі перевезення невеликих партій є вкрай неефективними, оскільки призводять до перевезення «повітря» та високої собівартості доставки одиниці вантажу. Схема 2 пропонує раціональне рішення: вона свідомо йде на невелике збільшення витрат на початковому етапі (збір вантажів на ЛЦ та їх обробка), щоб досягти кардинального зниження витрат на магістральному етапі за рахунок формування повнокомплектних транспортних засобів (FTL). Додаткові витрати на термінальні операції в країні відправлення більш ніж компенсуються економією від оптимального завантаження на міжнародному плечі перевезення.

Підприємствам із середньою та високою інтенсивністю вантажопотоків, більшим середнім обсягом замовлень та консолідованою клієнтською базою слід впроваджувати схему 3 (деконсолідація в країні призначення).

Зі зростанням масштабу операцій змінюється і ключовий логістичний виклик. Середні та великі підприємства природним чином генерують більш щільні та стабільні вантажопотоки. Обсяг їхніх щоденних відправлень або розмір окремих замовлень часто є достатнім для досягнення прийняттого рівня завантаження магістрального транспорту без необхідності попередньої консолідації. У цьому контексті застосування Схеми 2 стає контпродуктивним, воно додає непотрібний етап обробки, збільшує загальний час доставки та генерує додаткові термінальні витрати, не створюючи при цьому суттєвої економії на магістральному перевезенні.

Схема 3 є оптимальною, оскільки вона дозволяє використовувати найбільш ефективний спосіб транспортування (прямий FTL-рейс) для міжнародного перевезення, а потім залучати спеціалізований ЛЦ в країні призначення для оптимізованої доставки «останньої милі». Це дозволяє розформувувати великі партії, сортувати вантажі та використовувати для

локальної доставки менші, більш маневрені та економічні транспортні засоби, що є значно ефективнішим, ніж використання великовагового автопоїзда для численних зупинок у міських умовах.

4.5 Порівняльний аналіз ефективності схем доставки вантажів методом попарного порівняння

Метод попарного порівняння є одним із фундаментальних емпіричних методів у науковому дослідженні, що дозволяє встановити подібність та розходження між об'єктами за певними суттєвими ознаками [150]. Цей підхід є природним для людського мислення, оскільки порівняння виступає основою формування суджень та оцінки альтернатив. У логістиці та науці він набуває особливого значення, адже дає змогу не лише зіставляти окремі варіанти організації перевезень, а й системно аналізувати ефективність управлінських рішень.

Основна перевага методу полягає у його здатності надавати чітку перспективу характеристик та властивостей об'єктів, дозволяючи виявити як сильні, так і слабкі сторони кожної альтернативи. Хоча метод часто застосовується для оцінки якісних показників (наприклад, рівня сервісу, швидкості реагування чи гнучкості системи), він також ефективний для аналізу кількісних метрик, зокрема витрат, часу виконання операцій та продуктивності.

Для забезпечення наукової коректності попарне порівняння повинно ґрунтуватися на найбільш важливих критеріях, що відображають сутність досліджуваного явища. Важливо, щоб об'єкти мали об'єктивну спільність лише тоді їх порівняння буде інформативним. У протилежному випадку результати можуть бути викривленими або непрактичними.

Серед додаткових переваг цього методу можна відзначити [150]:

- простоту застосування – досліднику не потрібно будувати складні математичні моделі, достатньо зіставити об'єкти за обраними параметрами;
- гнучкість – метод можна використовувати для аналізу як невеликих вибірок (декілька схем), так і для складних систем, у яких порівнюються десятки альтернатив;
- виявлення пріоритетів – результати попарного порівняння дозволяють формувати рейтинг або ієрархію варіантів за рівнем ефективності;
- можливість інтеграції з іншими методами – наприклад, у поєднанні з методом аналізу ієрархій, багатокритеріальною оптимізацією чи економетричними моделями.

Водночас слід зазначити й обмеження: з ростом кількості об'єктів кількість попарних зіставлень зростає квадратично, що може ускладнювати обробку даних. Крім того, у випадку суб'єктивних оцінок важливо забезпечити узгодженість суджень, інакше результати можуть виявитися суперечливими. Таким чином, метод попарного порівняння є універсальним інструментом у дослідженнях пов'язаних з управлінням транспортних процесів. Він дозволяє не лише кількісно оцінювати ефективність різних схем доставки, але й якісно обґрунтовувати управлінські рішення, формуючи основу для вибору найбільш раціональної альтернативи.

На даному етапі дослідження проводиться попарний порівняльний аналіз економічної ефективності чотирьох розроблених транспортно-технологічних схем доставки вантажів. Метою аналізу є ідентифікація найбільш економічно доцільної схеми для кожної з трьох груп умов, що імітують різний масштаб операційної діяльності (малі, середні та великі підприємства). Аналіз базується на розрахунку різниці загальних витрат на доставку. Результати розрахунку наведені в таблиці 4.20.

Для поглибленого аналізу та наочної інтерпретації результатів порівняння економічної доцільності схем доставки було застосовано метод візуалізації даних за допомогою теплових матриць [151].

Таблиця 4.20 – Результати розрахунку різниці витрат при попарному порівнянні схем доставки для різних груп умов

Схеми	Значення різниці витрат при порівнянні відповідних варіантів, грн		
	1 група	2 група	3 група
Схема 1 - Схема 2	37150,64	-41443,87	24947,12
Схема 1 - Схема 3	16485,11	20137,21	44822,51
Схема 1 - Схема 4	19792,82	-206651,03	-63873,75
Схема 2 - Схема 1	-37150,64	41443,87	-24947,13
Схема 2 - Схема 3	-20665,52	61581,09	19875,41
Схема 2 - Схема 4	-17357,82	-165207,16	-88820,87
Схема 3 - Схема 1	-16485,11	-20137,21	-44822,54
Схема 3 - Схема 2	20665,52	-61581,09	-19875,42
Схема 3 - Схема 4	3307,70	-226788,25	-108696,3
Схема 4 - Схема 1	-19792,82	206651,03	63873,74
Схема 4 - Схема 2	17357,82	165207,15	88820,87
Схема 4 - Схема 3	-3307,70	226788,24	108696,29

Розрахунок відносного відхилення (Δ_{ij} %) виконувався за формулою:

$$\Delta_{ij}(\%) = \frac{C_i - C_j}{C_j} \times 100\% \quad (4.12)$$

де C_i – витрати за схемою i , грн.;

C_j – витрати за схемою j , грн.

Таким чином, додатне значення Δ_{ij} % вказує на те, що схема i є дорожчою за схему j , тоді як від'ємне значення свідчить про економічну перевагу схеми i (економію коштів).

Для візуалізації застосовано градієнтну кольорову шкалу, яка дозволяє інтуїтивно сприймати результати:

- спектр зеленого кольору, відповідає від'ємним значенням ($\Delta_{ij} \% < 0$). Насиченість кольору прямо пропорційна величині економії. Чим темніший зелений колір, тим значніша перевага схеми i над схемою j ;
- спектр червоного кольору, відповідає додатним значенням ($\Delta_{ij} \% > 0$). Насиченість кольору вказує на ступінь перевитрат. Чим темніший червоний колір, тим менш доцільною є схема i порівняно зі схемою j ;
- нейтральний жовтий колір, використовується для значень, близьких до нуля, що свідчить про паритет витрат або несуттєву різницю між схемами.

Теплові матриці були побудовані для кожної з трьох груп умов на основі відносних відхилень загальних витрат (рис. 4.18-4.20). Кожна матриця є квадратним полем, де рядки та стовпці відповідають чотирьом досліджуваним схемам доставки. Значення у клітинці на перетині рядка i та стовпця j відображає відсоткову різницю у витратах між схемою i та схемою j .

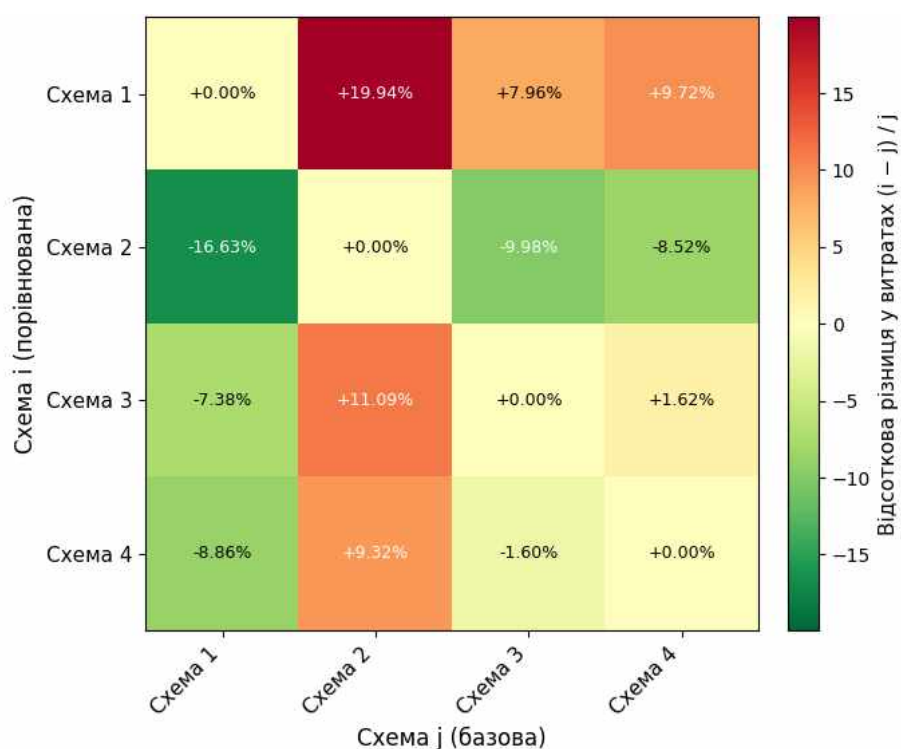


Рисунок 4.18 – Теплова матриця відносної різниці витрат між схемами доставки для першої групи умов

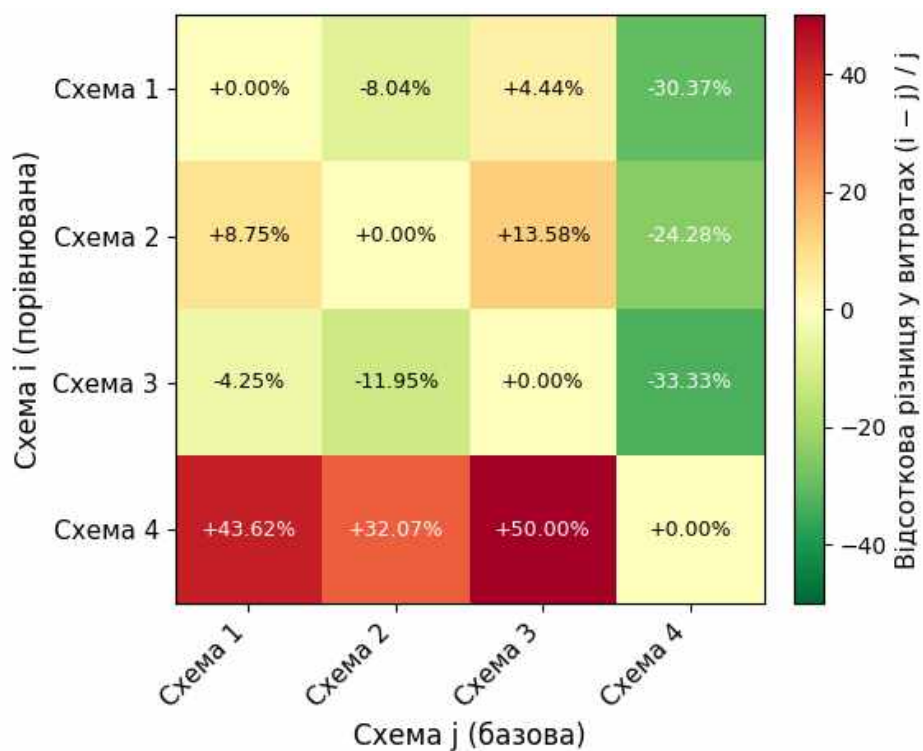


Рисунок 4.19 – Теплова матриця відносної різниці витрат між схемами доставки для другої групи умов

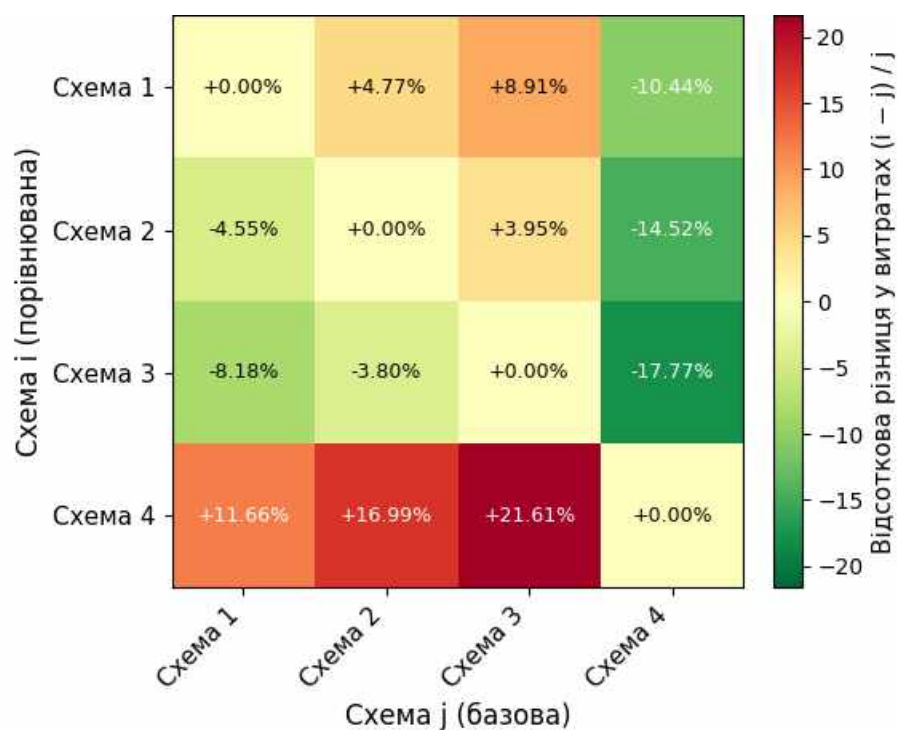


Рисунок 4.20 – Теплова матриця відносної різниці витрат між схемами доставки для третьої групи умов

Аналіз загальних витрат та їх попарного порівняння дозволяє визначити найбільш економічно доцільну схему для кожного сценарію операційної діяльності.

Для першої групи, що імітує діяльність малих підприємств з невисокою інтенсивністю вантажопотоків, схема 2 (з використанням логістичного центру в країні відправлення) є беззаперечним лідером. Вона на 16,6 % дешевша за пряму доставку (схема 1) та на 11,1 % дешевша за схему з ЛЦ в країні призначення (схема 3). Це свідчить про те, що для невеликих партій ефект від початкової консолідації вантажів є найбільш значущим фактором економії.

Для 2 групи умов (середніх підприємств) найбільш раціональною виявляється схема 3 (з використанням ЛЦ в країні призначення). Хоча вона лише на 4,2 % дешевша за пряму доставку, вона значно вигідніша за всі інші варіанти. Спроба консолідації (схема 2) або використання двох ЛЦ (схема 4) призводить до суттєвого здорожчання на 11,9 % та 50 % відповідно. Це вказує на те, що при середніх обсягах оптимальною є стратегія магістрального перевезення до єдиного центру з подальшою ефективною дистрибуцією «останньої милі».

Для великих підприємств, як і для середніх, найменші витрати забезпечує схема 3. Вона на 8,2 % дешевша за пряму доставку (схема 1) і на 3,8 % вигідніша за схему 2. Комбінована схема 4 є найдорожчою, що підтверджує висновок про те, що для великих, вже сформованих партій, ключовим фактором економії є не початкова консолідація, а оптимізація розподілу вантажів у країні призначення.

4.6 Висновки по розділу 4

1. Експериментально підтверджено існування нелінійної U-подібної залежності між рівнем завантаження ресурсів та загальними витратами в умовах стохастичної невизначеності. Встановлено, що економічний оптимум

функціонування системи досягається не при максимальному завантаженні, а в точці $\rho^*=0,92$, яка забезпечує баланс між витратами на утримання ресурсів та втратами від збоїв («вартість робастності»). Доведено, що ігнорування резервів часу призводить до експоненційного зростання витрат через ефект «доміно».

2. Доведено, що ефективність крос-докінгових операцій визначається не сумарною потужністю, а збалансованістю конфігурації трьох видів ресурсів – доків, персоналу та техніки. Імітаційне моделювання показало, що дефіцит будь-якого одного ресурсу створює «вузьке місце», яке нівелює інвестиції в інші ресурси. Кількісно обґрунтовано перевагу стратегії пріоритетної диспетчеризації над методом FIFO, що дозволяє уникнути штрафних санкцій за порушення часових вікон.

3. За результатами повного факторного експерименту розроблено та верифіковано (за критерієм Фішера) адекватні регресійні моделі показового типу, що описують залежність загальних витрат від інтенсивності заявок, середнього обсягу замовлення та кількості контрагентів. Аналіз поверхонь відгуку підтвердив наявність складної взаємодії між факторами, довівши, що найвищі питомі витрати виникають при комбінації низьких обсягів замовлення з високою частотою відправок, що вимагає застосування консолідаційних схем.

4. Обґрунтовано необхідність переходу від статичного планування до адаптивного управління логістичними процесами через впровадження концепції «оптимальної робочої зони» завантаження ресурсів. На основі аналізу чутливості розроблено матрицю прийняття рішень, яка дозволяє динамічно коригувати цільовий рівень завантаження (від 0,85 до 0,96) залежно від поточного рівня стохастичності зовнішнього середовища (режими «Зелений», «Жовтий», «Червоний»), мінімізуючи ризики зриву поставок.

5. Шляхом попарного порівняння доведено відсутність універсальної транспортно-технологічної схеми доставки. Чітко розмежовано сфери

ефективності: для малих підприємств (LTL-сегмент) економічно доцільною є схема з консолідацією в країні відправлення (зниження витрат до 16,6% порівняно з прямою доставкою), тоді як для середніх та великих підприємств оптимальною є схема з деконсолідацією в країні призначення (економія до 11,9%), що дозволяє оптимізувати доставку «останньої милі».

ВИСНОВКИ

1. На основі критичного аналізу світових тенденцій та специфіки українського ринку вантажних перевезень встановлено, що сучасний розвиток міжнародних автомобільних перевезень визначається не стільки еволюцією транспортних технологій, скільки зміною логіки функціонування логістичних систем під впливом діджиталізації, регуляторних трансформацій та критичних зовнішніх факторів. Аналіз світових тенденцій виявив, що цифрові інфраструктури перестали бути допоміжними інструментами – вони стали структуротворчими елементами логістичного середовища, яке переходить у режим реального часу. Порівняння міжнародних підходів і стану українського ринку продемонструвало, що саме комбінація зовнішніх впливів (зокрема військових) та цифрової інтеграції формує новий тип невизначеності, де класичні методи оптимізації втрачають адекватність. Це обґрунтовує потребу в адаптивних моделях, здатних поєднувати стохастичність, ризики та динамічні зміни транспортних мереж.

2. Сформовано наукову платформу для подальшого моделювання, визначивши, що обмеження традиційних концепцій мінімізації витрат полягає у нездатності врахувати багатовимірну природу невизначеності, включно з часовими, структурними та військовими ризиками. Запропонована методологія декомпозиції логістичного процесу, доповнена новою кількісною характеристикою – «індексом військового ризику» створює передумови для формування економічно обґрунтованих стратегій маршрутизації в умовах загроз. Показано, що ризик має топологічний характер, концентруючись у вузлах і коридорах транспортної мережі, а отже, оптимізація повинна переходити від статичних моделей до динамічних просторово-орієнтованих алгоритмів, які реагують на зміну інтенсивності загроз у реальному часі.

3. Запропоновано новий підхід до моделювання транспортно-логістичних систем, що ґрунтується на подієвому імітаційному моделюванні

та глибокій декомпозиції логістичного циклу. Створені діджитал-інструменти довели, що реалістичне відтворення стохастичних процесів дозволяє не тільки оцінювати ефективність логістичних схем, а й виявляти внутрішні механізми формування витрат, які недоступні для аналітичних моделей. Модель здатна відтворювати не лише середні характеристики, а й структурні закономірності поведінки системи – виникнення «вузьких місць», ефект черг, чутливість до зміни ресурсних конфігурацій. Це свідчить, що розроблений інструментарій виступає не просто засобом розрахунку, а науковим інструментом для виявлення прихованих взаємодій між параметрами.

4. Логістичні системи міжнародних перевезень мають нелінійний характер функціонування, а отже, оптимізація не може ґрунтуватися на припущенні про пропорційність між ресурсами та результатом. Ідентифікована U-подібна залежність між завантаженням термінальних ресурсів та витратами довела, що економічний оптимум розташовується у зоні часткового завантаження ($\rho \approx 0,92$), а надмірна інтенсифікація процесів породжує експоненційні втрати через каскадні ефекти. Доведено, що ключовим фактором ефективності є збалансованість ресурсів, а не їх абсолютний обсяг – дефіцит хоча б одного елемента (доку, персоналу, техніки) формує системне «вузьке місце», яке нівелює інвестиції в інші ресурси. Проведені експерименти та регресійний аналіз засвідчили, що транспортно-технологічні схеми реагують на зміну умов по-різному, а отже, стратегічні рішення повинні враховувати структуру попиту, інтенсивність потоків та характер консолідації вантажів. Високі значення F-критерію та R^2 підтвердили, що побудовані моделі не тільки статистично адекватні, але й розкривають закономірності впливу управлінських параметрів, формуючи основу для адаптивного планування.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Кириченко І. О., Кузьменко Н. М., Водолазський О. О. Якість транспортних послуг на різних видах транспорту // *Вісник східноукраїнського національного університету імені Володимира Даля*. 2021. № 4(268). С. 62–65. URL: <https://doi.org/10.33216/1998-7927-2021-268-4-62-65>.
2. Калініченко О. П., Іванушко, А. Є. «Удосконалення перевезень вантажів в міжнародному сполученні» // *Підвищення надійності машин і обладнання*. 2018. № 39.
3. Посонський С. Ф., Бабак О. П. *Проблеми організації міжнародних автомобільних перевезень в Україні* : дис. ... доктора філософії / Посонський С. Ф., Бабак О. П. ; Центральноукраїнський національний технічний університет. Кропивницький, 2020.
4. Експериментальне дослідження прибутковості міжнародних автомобільних перевезень вантажів за разовими заявками / Р. Horbachev та ін. // *Системи управління, навігації та зв'язку* : зб. наук. пр. 2018. Т. 4, № 50. С. 50–56. URL: <https://doi.org/10.26906/sunz.2018.4.050>
5. Пустовіт Ю. О. Автомобільні перевезення в міжнародній економічній діяльності // *Економіка та держава*. 2018. № 9. С. 91–94.
6. Ширяєва С. В., Свірін Д. О. Аналіз стану міжнародних автомобільних перевезень вантажів в Україні // *Вісник Національного транспортного університету*. 2016. № 1. С. 554–560.
7. Фалатюк О. С. Роль технічних систем моніторингу руху автотранспортних засобів при перевезенні вантажів у внутрішньому та міжнародному сполученні // *Південноукраїнський правничий часопис*. 2013. № 2. С. 122–123. URL: http://nbuv.gov.ua/UJRN/Pupch_2013_2_40 (дата звернення: 17.05.2025).
8. Сергєєва Л. В. Організація міжнародних транспортних перевезень // *Участь молоді у розвитку економіки та суспільства України*. 2012. С. 36.

9. Кунда Н. Т., Свинціцький О. І. Інформатизація на транспорті: проблеми та можливості // *Наука, технології, інновації: світові тенденції та регіональний аспект* : матеріали II Міжнар. наук.-практ. конф., (Одеса, 27–28 верес. 2019 р.). Одеса, 2019. С. 180–185. URL: <http://novaosvita.com/wp-content/uploads/2019/10/ScTechInn-OdesaSept2019.pdf>
10. Кунда Н., Лопотуха Є. Застосування інформаційних технологій на транспорті. InterConf. 2021. С. 403–410. URL: <https://doi.org/10.51582/interconf.7-8.11.2021.040>.
11. Назаров М. І., Нізельська М. А. Розвиток логістики на основі впровадження процесів діджиталізації // *Приазовський економічний вісник* : електрон. наук. журн. 2020. № 6 (23). DOI: 10.32840/2522-4263/2020-6-4.
12. Хоменко Н. Теоретико-методичні підходи щодо організаційно-економічного механізму розвитку інноваційного потенціалу підприємств автомобільного транспорту // *International Science Journal of Management, Economics & Finance*. 2022. Vol. 1, No. 3. С. 142–150. DOI: 10.46299/j.isjmef.20220103.11.
13. Schumpeter J. A. *Theorie der wirtschaftlichen Entwicklung*. Berlin : Duncker & Humblot, 1912. 53 с.
14. Organisation for Economic Cooperation and Development. *Frascati Manual 2015: Guidelines for Collecting and Reporting Data on Research and Experimental Development*. Paris : OECD Publishing, 2015. 402 с.
15. Хмелевський О. В. Перспективи цифрової трансформації міжнародної логістики // *Вісник Хмельницького національного університету*. 2019. Т. 1, № 6. С. 189–193. DOI: 10.31891/2307-5740-2019-276-6-35.
16. Ложачевська О. М., Дяченко Т. О., Артемчук В. О. Формування комунікаційних каналів дистрибуції автотранспортних послуг на міжнародному ринку // *Наукові інновації та передові технології*. 2022. № 2 (4). С. 199–207. DOI: 10.52058/2786-5274-2022-2(4)-199-207.

17. Engström J., Bishop R., Shladover S. E. et al. Deployment of Automated Trucking: Challenges and Opportunities // *Road Vehicle Automation 5* / ed. by G. Meyer, S. Beiker. Cham : Springer International Publishing, 2019. P. 149–162. ISBN 978-3-319-94895-9.
18. Січкаренко К. О. Вплив цифровізації економіки на розвиток транспортної галузі // *Причорноморські економічні студії*. 2019. Вип. 38–1. С. 76–79.
19. Гринчак Н. А. Аналіз впливу технологій Інтернету речей на розвиток ринку транспортно-логістичних послуг // *Науковий вісник Національної академії статистики, обліку та аудиту* : зб. наук. пр. 2019. № 4. С. 74–82. DOI: 10.31767/nasoa.4.2019.07.
20. Manoj Kumar N., Dash A. Internet of things: an opportunity for transportation and logistics // *Proceedings of the International Conference on Inventive Computing and Informatics (ICICI 2017)*. 2017. P. 194–197.
21. Kejin W., Wenhui S., Aichun Z. Research on the Application of Electronic Information Technology in the Internet of Things. Journal of Physics: Conference Series. 2020. Vol. 1570. P. 012067. URL: <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1570/1/012067>.
22. Гончарук А. В., Бушуєва Н. В. Застосування технологій GPS/GSM в управлінні транспортними перевезеннями // *Вісник Національного університету водного господарства та природокористування. Серія: Економіка*. 2019. № 3 (87). С. 218–230. DOI: 10.32836/2310-9653-2019-3-218-230.
23. Система контролю GPSM - GPS моніторинг транспорту та контроль палива URL: <https://gpsm.ua/systema-kontrol-gpsm/> (дата звернення: 17.05.2022).
24. Які переваги використання GPS моніторингу? URL: <https://fixon.com.ua/pochemu-vazhno-ispolzovat-gps-dlya-gruzoperevozok/> (дата звернення: 17.05.2022).

25. *GPS моніторинг транспорту та контроль палива | Система FREETRACK* URL: <https://freetrack.com.ua/gps/> (дата звернення: 17.05.2022).
26. Ширяєва С. В., Дяченко І. О. *Підвищення ефективності перевезень вантажів із застосуванням інтелектуальних транспортних систем* / С. В. Ширяєва, І. О. Дяченко ; УкрІНТЕІ. Київ : УкрІНТЕІ, 2021. 139 с. Депоновано в УкрІНТЕІ 06.07.2021, № 370.
27. Каличева Н. Є., Масан В. В., Сафронов О. Е. Хмарні технології як інструмент забезпечення конкурентного розвитку підприємств залізничного транспорту // *Підприємництво та інновації*. 2021. № 20. С. 51–55.
28. Швець А. В., Гриценко С. І. Впровадження сучасних інформаційних технологій в мережі МТК // *Проблеми підготовки професійних кадрів з логістики в умовах глобального конкурентного середовища* . С. 399.
29. Задніпрянець А. А. *Координація міжнародної політики щодо ланцюжків поставок, що контролюються за допомогою технології блокчейн*. 2021.
30. Гавриш О. А., Башилова В. П. Інноваційно-інвестиційні процеси в національній економіці та підприємстві // *Сучасні проблеми економіки та підприємництва*. 2014. № 13 С. 78–85.
31. Волков Д. В. Впровадження digital-технологій на транспорті // *«Digitalization of the economy as a factor of sustainable development» Materials*. 2021. С. 137–13.
32. Севідова В. В., Калініченко О. П. Застосування цифрових технологій при міжнародних перевезеннях вантажів // *«Комп'ютерно-інтегровані технології автоматизації технологічних процесів на транспорті та у виробництві» : матеріали Всеукр. наук.-практ. конф. здобувачів вищ. освіти і молодих учених*. - Харків: ХНАДУ, 2021. С. 179–183.
33. Stepura V. The essence of blockchain technology and its application in the financial sphere // *Pryazovskyi Economic Herald*. 2021. No. 1(24). URL: <https://doi.org/10.32840/2522-4263/2021-1-33>.

34. Демченко Є. Б., Дорош А. С., Сковрон І. Я. Сучасні інформаційні системи на ринку вантажних перевезень України // *Транспортні системи та технології перевезень*. 2022. Вип. 23. С. 79.
35. Khodova Y. Iplementation of the strategy for the development of the digital platform of the transport and logistics complex // *Young Scientist*. 2020. Vol. 4, № 80. URL: <https://doi.org/10.32839/2304-5809/2020-4-80-9>.
36. Мірошніков Ю. Без паперу та з економією: як європейська інновація e-CMR допоможе українським перевізникам // *Європейська правда* : веб-сайт. 22.12.2021. URL: <https://www.eurointegration.com.ua/experts/2021/12/22/7131845/>
37. eCMR | PPL33-35 : веб-сайт. URL: <https://www.ppl33-35.com/ecmr> (дата звернення: 17.05.2022).
38. Yojee - AI Powered Logistics & Supply Chain Software Solution : веб-сайт. URL: <https://yojee.com/> (дата звернення: 17.05.2022).
39. Підвищуйте ефективність перевезень з A2B.DIRECT. URL: <https://a2b.direct/ua> (дата звернення: 19.05.2022).
40. Летичевський О. О., Горбатюк С. О. Децентралізовані системи в логістиці: огляд використання та проблеми безпеки // *Проблеми програмування*. 2020. № 1. С. 55–69. DOI: 10.15407/pp2020.01.055.
41. Оксенюк К. І., Нікітін Т. О. Підвищення ефективності логістичних процесів шляхом використання інформаційних технологій // *Економічні науки. Серія: Регіональна економіка*. 2021. Вип. 18 (71). С. 131–139.
42. Онлайн-сервіси для логістики та перевезень. URL: <https://www.livebusiness.com.ua/tool/247/> (дата звернення: 19.05.2022).
43. Guar TMS: дієвий інструмент управління транспортом - пояснюємо що це і як працює. URL: <https://bilyayivka.city/articles/112732/guar-tms-diyevij-instrument-upravlinnya-transportom> (дата звернення: 19.05.2022).
44. Chronotruck by GEFCO - Europe's leading digital freight forwarder. URL: https://www.chronotruck.com/en_GB/ (дата звернення: 19.05.2022).

45. *Cargofy - Інноваційна логістична платформа для вантажоперевезень.*
URL: <https://cargofy.com/uk/> (дата звернення: 20.05.2022).
46. *E-CMR: як цифрові рішення можуть підвищити ефективність автомобільних вантажоперевезень. Міжнародна рада з питань реформ (IRF).* URL: <https://www.irf.ua/e-cmr-yak-czyfrovi-rishennya-mozhut-pidvyshhyty-efektyvnist-avtomobilnyh-vantazhoperevezen/> (дата звернення: 20.05.2022).
47. Про приєднання України до Додаткового протоколу до Конвенції про договір міжнародного автомобільного перевезення вантажів (КДПВ) стосовно електронної накладної : Закон України від 03.06.2020 № 660-IX. *Верховна Рада України : офіційний вебпортал.* URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/660-20#Text> (дата звернення: 20.05.2022).
48. *Приєднуйтесь до e-CMR революції | CARGOON.* URL: <https://cargoon.eu/ua/inshe/join-the-e-cmr-revolution/> (дата звернення: 22.05.2022).
49. Комчатних О. В. Фінансування інноваційного розвитку транспортних підприємств України // *Глобальні та національні проблеми економіки* : електрон. наук. журн. 2018. С. 402–407.
50. Шатіло О. В. Вплив інновацій на розвиток автотранспортних підприємств України // *Стратегія економічного розвитку України.* 2018. № 43. С. 118–128. DOI: 10.33111/sedu.2018.43.118.128.
51. Про схвалення Національної транспортної стратегії України на період до 2030 року : Розпорядження Кабінету Міністрів України від 07.06.2018 № 430-р. *Верховна Рада України : офіційний вебпортал.* URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/430-2018-%D1%80#Text> (дата звернення: 30.05.2022).
52. Кічка О. І. Вибір оптимальної схеми доставки вантажів в логістичних системах // *Вісник Східноукраїнського національного університету імені Володимира Даля.* 2015. № 2 (219). С. 9–11.

53. Загорянський В. Г. Особливості транспортно-технологічних систем, що включають автомобільні перевезення, як комплекс технологічних операцій // *Вісник Кременчуцького національного університету імені Михайла Остроградського*. 2017. Вип. 5 (106). С. 62–67.
54. Яцківський Л. Ю., Зеркалов Д. В. *Загальний курс транспорту. Книга 2 : навч. посіб.* Київ : Арістей, 2007. 504 с.
55. *Прогресивні транспортно-технологічні системи (ТТС) при міжнародних перевезеннях вантажів.* URL: <https://jak.koshachek.com/articles/progresivni-transportno-tehnologichni-sistemi-tts.html> (дата звернення: 30.05.2022).
56. Горяїнов О. М. *Вантажні перевезення : конспект лекцій (для студентів напряму підготовки – “Транспортні технології”)* / О. М. Горяїнов ; Харків. нац. акад. міськ. госп-ва. Харків : ХНАМГ, 2009. 109 с.
57. Шматко Д. З. *Організація автомобільних перевезень : конспект лекцій (для здобувачів вищої освіти першого (бакалаврського) рівня зі спеціальності 274 “Автомобільний транспорт”)* / Д. З. Шматко ; Дніпров. держ. техн. ун-т. Кам’янське : ДДТУ, 2018.
58. Вибір оптимального перевізника та логістичних посередників. *Pidru4niki.com* : веб-сайт. URL: https://pidru4niki.com/1061120750941/logistika/vibir_optimalnogo_pereviznika_logistichnih_poserednikov (дата звернення: 02.06.2022).
59. Нагорний Є. В., Ломотько Д. В., Шраменко Н. Ю. *Транспортно-експедиторська діяльність : підручник* / Є. В. Нагорний, Д. В. Ломотько, Н. Ю. Шраменко / Харків. нац. автомоб.-дор. ун-т. Харків : ХНАДУ, 2012. 352 с.
60. Кічкіна О. І. Вибір оптимальної схеми доставки вантажу в логістичних системах // *Вісник Східноукраїнського національного університету імені Володимира Даля*. 2015. № 2 (219). С. 9–11.
61. Кунда Н. Т., Іванчук С. І., Панченко Ю. В. Застосування методів дослідження операцій для вибору схеми доставки вантажів // *Управління*

проектами, системний аналіз і логістика. Технічна серія. 2013. Вип. 11. С. 36–47.

62. Вишневський Д. О., Вишневська О. Д. Критерії відбору альтернативних варіантів доставки зовнішньоторгівельних вантажів // *Вісник Східноукраїнського національного університету імені Володимира Даля. 2017. № 4. С. 262–264.*
63. Шраменко Н. Ю. Системний підхід до процесу доставки вантажів в міжнародному сполученні в умовах невизначеності // *Вісник Вінницького політехнічного інституту. 2009. С. 43–46.*
64. Berestenko V. V., Onyshchenko S. P. Структура й характеристики мультимодальної доставки з позиції цифровізації // *Transport development. 2022. № 4(11). С. 82–93.*
URL: <https://doi.org/10.33082/td.2021.4-11.08>.
65. Дослідження факторів впливу на загальні витрати виконання оборотного рейсу у міжнародному сполученні з використанням математичної теорії експерименту / В. Сахно та ін. // *Сучасні технології в машинобудуванні та транспорті. 2021. Т. 1, № 16. С. 159–167.*
URL: <https://doi.org/10.36910/automash.v1i16.518>.
66. Nahorniyy Ye., Orda O., Kondratenko D. Вибір оптимальної транспортно-технологічної схеми доставки вантажів у міжнародному сполученні // *Автомобільний транспорт. 2020. № 47. С. 44. DOI: 10.30977/AT.2219-8342.2020.47.0.44.*
67. Шаповал Ю. О., Павленко О. В. Методика вибору раціональної схеми доставки тарно-штучних вантажів у міжнародному сполученні // *Підвищення надійності машин і обладнання. 2018. С. 36.*
68. Босняк М. Г. *Вантажні автомобільні перевезення* : навч. посіб. / М. Г. Босняк. Київ : Видавничий Дім «Слово», 2010. 408 с.
69. Очеретенко С. В., Дмитрієва К. С. Дослідження питання удосконалення системи доставки вантажів у міжнародному сполученні на

автотранспортних підприємствах // *Комунальне господарство міст. Серія: Технічні науки та архітектура*. 2018. Вип. 140. С. 76–80.

70. Литвиненко А. Г., Нагорний Є. В. Формування транспортно-технологічної схеми доставки вантажів по транспортному коридору «південь–захід» // *Підвищення надійності машин і обладнання*. 2018. С. 46.
71. Pavlenko O., Velykodnyi D. The choice of rational technology of delivery of grain cargoes in the containers in the international traffic // *International journal for traffic and transport engineering*. 2017. Vol. 7, No. 2. P. 164–176. DOI: 10.7708/ijtte.2017.7(2).02.
72. Polishchuk V.P., Liubov Guzhevskya, Olena Denys. Економіко-математична модель перевезення вантажів у міжнародному контрейлерному сполученні // *European Journal of Intelligent Transportation Systems*. 2021. № 1(3). URL: https://doi.org/10.31435/rsglobal_ejits/30032021/7371.
73. Aulin V., Lyashuk O., Pavlenko O. et al. Realization of the logistic approach in the international cargo delivery system // *Communications - Scientific Letters of the University of Zilina*. 2019. Vol. 21, No. 2. P. 3–12.
74. Копытков D., Pavlenko O. An approach to determine the rational scheme of delivery for the international consolidated shipments // *Комунальне господарство міст*. 2019. Вип. 1 (147). С. 35–41. DOI: 10.33042/2522-1809-2019-1-147-35-41.
75. Ольхова М. В. Сфери раціонального використання автомобільного і залізничного видів транспорту : монографія / М. В. Ольхова, Ю. О. Давідіч, Д. М. Рославцев ; Харків. нац. ун-т міськ. госп-ва ім. О. М. Бекетова. Харків : ХНУМГ ім. О. М. Бекетова, 2018. 217 с. ISBN 978-966-695-460-5.
76. Khalipova N., Bosov A., Prohoniuk I. Development of a model for the integrated management of the international delivery chains formation // *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2018. Vol. 3, no. 3 (93). P. 59–72. URL: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2018.132683>.

77. Rusanova S., Onyshchenko S. Development of transport and technological process options' concept for goods delivery with participation of maritime transport // *Technology audit and production reserves*. 2020. Vol. 1, no. 2(51). P. 24–29. URL: <https://doi.org/10.15587/2312-8372.2020.198373>.
78. Мельник О. М. Технологічні аспекти перевезення негабаритних вантажів // *Вчені записки Таврійського національного університету імені В. І. Вернадського. Серія: Технічні науки*. 2020. Т. 31 (70), № 2, ч. 2. С. 168–174. DOI: 10.32838/2663-5941/2020.2-2/29.
79. Науково-технічні дослідження у галузі транспорту : колективна монографія / за заг. ред. Д. В. Ломотька ; Академія технічних наук України. Івано-Франківськ : Видавець Кушнір Г. М., 2022. Т. 2. 216 с.
80. Сенаторова А. О., Процик О. П. Розробка раціональних транспортно-технологічних схем доставки вантажів з Європи в Азію / А. О. Сенаторова, О. П. Процик // *Вісник Національного транспортного університету. Серія «Технічні науки» : науковотехн. зб.* Київ : НТУ, 2018. Вип. 1 (40).
81. Аулін В. В., Голуб Д. В., Великодній Д. О., Дьяченко В. О. Розв'язання проблеми надійності технологічних процесів вантажних перевезень підприємствами агропромислового виробництва // *Центральноукраїнський науковий вісник. Технічні науки*. 2019. № 1 (32). С. 36–45. DOI: 10.32515/2664-262X.2019.1(32).36-45.
82. Janić M. Multicriteria Evaluation of Intermodal (Rail/Road) Freight Transport Corridors. *Logistics & Sustainable Transport*. 2020. Vol. 11, no. 1. P. 1–23. URL: <https://doi.org/10.2478/jlst-2020-0001>.
83. Yi Y., Kim E. Spatial economic impact of road and railroad accessibility on manufacturing output: Inter-modal relationship between road and railroad // *Journal of Transport Geography*. 2018. Vol. 66. P. 144–153. URL: <https://doi.org/10.1016/j.jtrangeo.2017.11.017>.
84. Багрій М., Клименко В., Новальська Н. та ін. Організаційно-технологічні засади взаємодії видів транспорту в системі міжнародних вантажних

- перевезень та при перетині митного кордону України // *Наукоємні технології*. 2022. Т. 53, № 1. С. 58–69. DOI: 10.18372/2310-5461.53.16509.
85. Бабина Д. А., Кунда Н. Т. SD-модель взаємодії різних видів транспорту. // *Вісник Східноукраїнського національного університету імені Володимира Даля : Фізичні науки*.- 2019.- № 3 (251). - С. 113-116.
 86. Чень Ю. Міжнародні змішані перевезення: теоретична сутність та практичне значення // *Вісник Запорізького національного університету. Економічні науки*. 2018. № 4. С. 91–97. DOI: 10.26661/2414-0287-2018-4-40-14.
 87. П'ять вразливих місць перевезень. Що заважає «Укрзалізниці» подвоїти експорт. URL: <https://thepage.ua/ua/economy/biznes-ta-zaliznichni-merezhi-krayin-yes-viyavilas-ne-gotovimi-do-zbilshennya-eksportu-z-ukrayini> (дата звернення: 06.06.2022).
 88. *Транспортна екологія* : навч. посіб. / О. І. Запорожець, С. В. Бойченко, О. Л. Матвєєва та ін. ; Нац. авіац. ун-т. Київ : НАУ, 2017. 507 с.
 89. Shandrivska O. Y. Transformation of the Ukrainian transport cargo system in war conditions. The russian-ukrainian war (2014–2022): historical, political, cultural-educational, religious, economic, and legal aspects. 2022. P. 378–386. URL: <https://doi.org/10.30525/978-9934-26-223-4-47>.
 90. Новак В., Кириленко О., Розумова К., Игнатюк В. Організація міжнародних перевезень вантажів основними видами транспорту (огляд) // *Наукоємні технології*. 2022. Т. 53, № 1. С. 70–76. DOI: 10.18372/2310-5461.53.16510.
 91. Додатковий протокол до Конвенції про договір міжнародного автомобільного перевезення вантажів (КДПВ) стосовно електронної накладної. *Верховна Рада України : офіційний вебпортал*. URL: https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/984_011#Text (дата звернення: 18.06.2022).

92. Таран С., Яворський П., Павицька Ю. та ін. Аналіз торгівлі послугами між Україною та ЄС в рамках ПВЗВТ // Центр аналітики міжнародної торгівлі Trade+ Київської школи економіки. Київ, 2021. URL: <https://kse.ua/wp-content/uploads/2021/11/FinalDCFTA-services-2021-11-11.pdf>
93. Liutyi D., Hrinko I. Features of the development of international cargo transportation between Ukraine and eu member countries. Economic scope. 2023. URL: <https://doi.org/10.32782/2224-6282/188-3>.
94. Ковальчук С. Я., Гловюк А. С., Ковальчук І. В. Особливості обліку та оподаткування міжнародних вантажних перевезень // *Глобальні та національні проблеми економіки* : електрон. наук. журн. С. 859–863.
95. Бугерчук А. О. Проблеми надання транспортних послуг в Україні і шляхи їх вирішення // *Конкурентоспроможність вітчизняних підприємств-надавачів послуг громадського транспорту: актуальні проблеми та європейський досвід їх вирішення* : зб. тез доп. III Всеукр. наук.-практ. конф. студ., аспірантів та молодих вчених з міжнар. участю (м. Тернопіль, 19-20 трав. 2020 р.). Тернопіль, 2020. С. 52–55.
96. Багрій М., Клименко В., Новальська Н. та ін. Організаційно-технологічні засади взаємодії видів транспорту в системі міжнародних вантажних перевезень та при перетині митного кордону України // *Наукоємні технології*. 2022. Т. 53, № 1. С. 58–69. DOI: 10.18372/2310-5461.53.16509.
97. *Державна служба статистики України* : офіційний веб-сайт. URL: <http://ukrstat.gov.ua/> (дата звернення: 28.06.2022).
98. Мірошніченко О. А. *Наслідки епідемії COVID-19 та карантинних заходів для провідних секторів економіки України* : дослідження за результатами глибинних інтерв'ю з власниками та топ-менеджерами українських компаній. Київ ; Харків : Б. в., 2020. 188 с.
99. Логістика в період пандемії. *Польсько-Українська Господарча Палата*. URL: <https://www.pol-ukr.com/uk/logistika-v-period-pandemi%D1%97/> (дата звернення: 28.06.2022).

100. Нестача дозволів на міжнародні вантажні автоперевезення: хронічні проблеми ринку та економічні наслідки. *Intelmag* URL: <https://intelmag.com/transport/18012-nestacha-dozvoliv-na-mizhnarodni-vantazhni-avtoperevezennya-hronichni-problemy-rynku-ta-ekonomichni-naslidky/> (дата звернення: 30.06.2022).
101. Україна втратила €500 млн через нестачу дозволів на вантажоперевезення до ЄС. *AgroNews.ua* :URL: <https://agronews.ua/news/ukrayina-vtratyla-e500-mln/> (дата звернення: 30.06.2022).
102. Калініченко О. П. Підвищення ефективності доставки вантажів в міжнародному сполученні // *Матеріали 86-ї наук.-техн. та наук.-метод. конф. ун-ту (12 трав. 2022 р.)*. Харків : ХНАДУ, 2022. С. 3.
103. Божидай І., Устіловська А., Накалюжна А. Визначення ролі транспортної галузі в національній економіці України за допомогою економіко-математичного моделювання з проєкцією на країни ЄС // *Актуальні питання у сучасній науці*. 2022. № 1 (1). С. 108–120. DOI: 10.52058/2786-6300-2022-1(1)-108-120.
104. Війна в Україні негативно вплинула на європейську транспортну галузь. *Logist.FM* : URL: <https://logist.fm/news/viyna-v-ukrayini-negativno-vplinula-na-ievropeysku-transportnu-galuz> (дата звернення: 30.06.2022).
105. Кубраков О. Транспортний безвіз з ЄС починає діяти. *Кабінет Міністрів України : єдиний веб-портал органів виконавчої влади України*. URL: <https://www.kmu.gov.ua/news/oleksandr-kubrakov-transportnij-bezviz-z-yes-pochinaye-diyati> (дата звернення: 30.06.2022).
106. Україна та ЄС затвердили «транспортний безвіз»: що це означає. *Слово і Діло*. URL: <https://www.slovoidilo.ua/2022/06/29/novyna/suspilstvo/ukrayina-ta-yes-zatverdily-transportnyj-bezviz-ce-oznachaye> (дата звернення: 30.06.2022).
107. Транспортний безвіз із ЄС. Як він працює та що дасть українській економіці. *Економічна правда*

URL: <https://www.epravda.com.ua/rus/columns/2022/07/6/688923/> (дата звернення: 30.06.2022).

108. Конвенція про процедуру спільного транзиту. *Верховна Рада України : офіційний вебпортал*. URL: https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/994_001-87#Text (дата звернення: 30.06.2022).
109. Микуляк О. В. Митні відносини України та світу в умовах війни // *Grail of Science*. 2022. № 17. С. 109–114. DOI: 10.36074/grail-of-science.22.07.2022.016.
110. Спільний транзит (NCTS). *Міністерство фінансів України*. URL: https://mof.gov.ua/uk/common_transit_mode-473 (дата звернення: 30.06.2022).
111. Li Q., Wu G. ERP System in the Logistics Information Management System of Supply Chain Enterprises // *Mobile Information Systems*. 2021. Vol. 2021. P. 1–11. URL: <https://doi.org/10.1155/2021/7423717>.
112. Osinska M., Zalewski W. Determinants of Using Telematics Systems in Road Transport Companies. *EUROPEAN RESEARCH STUDIES JOURNAL*. 2020. Vol. XXIII, Issue 2. P. 474–487. URL: <https://doi.org/10.35808/ersj/1604>.
113. Rokicki T., Ziółkowska P. Integrated IT systems in logistics company management // *Ekonomika i Organizacja Logistyki*. 2020. Vol. 5, no. 1. P. 55–64. URL: <https://doi.org/10.22630/eiol.2020.5.1.5>.
114. Ivankova G. V., Mochalina E. P., Goncharova N. L. Internet of Things (IoT) in logistics // *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2020. Vol. 940. P. 012033. URL: <https://doi.org/10.1088/1757-899x/940/1/012033>.
115. Smart logistics based on the internet of things technology: an overview / Y. Ding et al. // *International Journal of Logistics Research and Applications*. 2020. P. 1–23. URL: <https://doi.org/10.1080/13675567.2020.1757053>.
116. Industrial IoT and AI implementation in vehicular logistics and supply chain management for vehicle mediated transportation systems / A. Bhargava et al

// *International Journal of System Assurance Engineering and Management*.
2022. URL: <https://doi.org/10.1007/s13198-021-01581-2>.

117. Attributes and Effect of Implementation of Warehouse Management System (WMS) for Company Sustainability / A. F. Samsudin et al. // *Jurnal Teknologi Transportasi dan Logistik*. 2023. Vol. 4, no. 2. P. 199–212. URL: <https://doi.org/10.52920/jttl.v4i2.202>.
118. Mostafa N., Hamdy W., Elawady H. An Intelligent Warehouse Management System Using the Internet of Things // *Egyptian Journal for Engineering Sciences and Technology*. 2020. Vol. 32, no. 1. P. 59–65. URL: <https://doi.org/10.21608/eijest.2020.42338.1009>.
119. Improvements in the Warehouse of a Danish Transport and Logistics Company Through a WMS Implementation / M. T. Pereira et al. // *Lecture Notes in Mechanical Engineering*. Cham, 2023. P. 325–336. URL: https://doi.org/10.1007/978-3-031-17629-6_34.
120. Srinivasan M., Hamdani M., Ma S. Four supply chain management systems: From supply chain strategies to human resource management // *Business Horizons*. 2021. Vol. 64, no. 2. P. 249–260. URL: <https://doi.org/10.1016/j.bushor.2020.11.006>.
121. Supply chain management 4.0: a literature review and research framework / K. Zekhnini et al. *Benchmarking // An International Journal*. 2020. Ahead-of-print, ahead-of-print. URL: <https://doi.org/10.1108/bij-04-2020-0156>.
122. Sustainable Supplier Selection and Evaluation for the Effective Supply Chain Management System / Q. Zhu et al. *Systems*. 2022. Vol. 10, no. 5. P. 166. URL: <https://doi.org/10.3390/systems10050166>.
123. Helo P., Hao Y. Artificial intelligence in operations management and supply chain management: an exploratory case study // *Production Planning & Control*. 2021. P. 1–18. URL: <https://doi.org/10.1080/09537287.2021.1882690>.

124. Černá L., Zitrický V., Daniš J. The Methodology of Selecting the Transport Mode for Companies on the Slovak Transport Market // *Open Engineering*. 2017. Vol. 7, No. 1. P. 6–13. DOI: 10.1515/eng-2017-0002.
125. Engström J. et al. Deployment of Automated Trucking: Challenges and Opportunities // *Road Vehicle Automation 5* / ed. by G. Meyer, S. Beiker. Cham : Springer, 2019. P. 149–162. (Lecture Notes in Mobility). DOI: 10.1007/978-3-319-94896-6_13.
126. Ben-Daya M., Hassini E., Bahroun Z. Internet of things and supply chain management: a literature review // *International Journal of Production Research*. 2019. Vol. 57, No. 15-16. P. 4719–4742.
127. Аналіз ринку логістики в Україні у 2024 році. *Impulse Consulting* : URL: <https://www.impulse-consulting.com.ua/analiz-rynku-logistyky-v-ukrayini-u-2024-roci/> (дата звернення: 30.06.2022).
128. Kalinichenko O., Sevidova V. Improvement of warehouse technology in international freight transportation // *Municipal economy of cities*. 2024. Vol. 6, No. 187. P. 302–307. DOI: 10.33042/2522-1809-2024-6-187-302-307.
129. Kalinichenko O., Pavlenko O. Methodology for determining the rational technology for moving goods in the warehouse // *Municipal economy of cities*. 2023. Vol. 6, No. 180. P. 231–236. DOI: 10.33042/2522-1809-2023-6-180-231-236.
130. Huayhua Machaca K., Manchego Pacco P., Pro Aragón M. S. et al. Cross docking as a logistics strategy. Analysis on Nacex, FedEx and Maersk // *Región Científica*. 2025. DOI: 10.58763/rc2025388.
131. Battarra I., Accorsi R., Lupi G. et al. Location-allocation problem in a multi-terminal cross-dock distribution network for palletized perishables delivery // *Transportation Research Procedia*. 2022. Vol. 67. P. 172–181. DOI: 10.1016/j.trpro.2022.12.048.
132. Castellucci P. B., Costa A. M., Toledo F. Network scheduling problem with cross-docking and loading constraints // *Computers & Operations Research*. 2021. Vol. 132. Art. 105271. DOI: 10.1016/j.cor.2021.105271.

133. Smith A., Toth P., Bam L., van Vuuren J. H. A multi-tiered vehicle routing problem with global cross-docking // *Computers & Operations Research*. 2022. Vol. 137. Art. 105526. DOI: 10.1016/j.cor.2021.105526.
134. Torbali B., Alpan G. A Multi-Agent-Based Real-Time Truck Scheduling Model for Cross-Docking Problems with Single Inbound and Outbound Doors // *Supply Chain Analytics*. 2023. Vol. 4 (Замість "100028" вказується номер тому/випуску, якщо є, або номер статті). Art. 100028. DOI: 10.1016/j.sca.2023.100028.
135. Chargui T., Bekrar A., Reghioui M., Trentesaux D. Scheduling trucks and storage operations in a multiple-door cross-docking terminal considering multiple storage zones // *International Journal of Production Research*. 2020. P. 1–25. DOI: 10.1080/00207543.2020.1853843.
136. Monemi R. N., Gelareh S. Dock assignment and truck scheduling problem; consideration of multiple scenarios with resource allocation constraints // *Computers & Operations Research*. 2022. Art. 106074. DOI: 10.1016/j.cor.2022.106074.
137. Shahmardan A., Sajadieh M. S. Truck scheduling in a multi-door cross-docking center with partial unloading – Reinforcement learning-based simulated annealing approaches // *Computers & Industrial Engineering*. 2020. Vol. 139. Art. 106134. DOI: 10.1016/j.cie.2019.106134.
138. Zeng Y., Li W., Li C. A dynamic simulation framework based on hybrid modeling paradigm for parallel scheduling systems in warehouses // *Simulation Modelling Practice and Theory*. 2024. P. 102921. URL: <https://doi.org/10.1016/j.simpat.2024.102921>.
139. Trade-offs in ready-mixed concrete truck scheduling considering stochastic congestion: A novel multi-objective model driven by strength Pareto evolutionary algorithm / W. Wang et al. // *Computers & Industrial Engineering*. 2025. Vol. 203. P. 111000. URL: <https://doi.org/10.1016/j.cie.2025.111000>.

140. Bossong P., Reinhardt A., Elbert R. Digital platforms in intermodal freight transport: an analysis of emerging business models and their future dynamics // *International Journal of Physical Distribution & Logistics Management*. 2025. URL: <https://doi.org/10.1108/ijpdlm-02-2024-0072>.
141. Python GUI Programming: Your Tkinter Tutorial. URL: https://realpython.com/python-gui-tkinter/?utm_source=chatgpt.com (дата звернення 29.09.2024).
142. Bottani E., Casella G. Discrete-event simulation in logistics and supply chain management: a scientometric perspective // *Production & Manufacturing Research*. 2024. Vol. 12, no. 1. URL: <https://doi.org/10.1080/21693277.2024.2415038>.
143. Correa Issi G., Linfati R., Escobar J. W. Mathematical Optimization Model for Truck Scheduling in a Distribution Center with a Mixed Service-Mode Dock Area // *Journal of Advanced Transportation*. 2020. Vol. 2020. P. 1–13. URL: <https://doi.org/10.1155/2020/8813372>.
144. Applications of Artificial Intelligence in Cross Docking: A Systematic Literature Review / A. Altaf et al. // *Journal of Computer Information Systems*. 2022. P. 1–21. URL: <https://doi.org/10.1080/08874417.2022.2143455>.
145. MOSAIK 3.0: Combining Time-Stepped and Discrete Event Simulation / A. Ofenloch et al. 2022 *Open Source Modelling and Simulation of Energy Systems (OSMSES)*, Aachen, Germany, 4–5 April 2022. 2022. URL: <https://doi.org/10.1109/osmses54027.2022.9769116>.
146. Omotehinwa T. O. Examining the developments in scheduling algorithms research: A bibliometric approach // *Heliyon*. 2022. Vol. 8, no. 5. P. e09510. URL: <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2022.e09510>.
147. Riehl K., Kouvelas A., Makridis M. A. Revisiting reproducibility in transportation simulation studies // *European Transport Research Review*. 2025. Vol. 17, no. 1. URL: <https://doi.org/10.1186/s12544-025-00718-9>.

148. Paul A., Saha S. C. A Systematic Literature Review on Flexible Strategies and Performance Indicators for Supply Chain Resilience // *Global Journal of Flexible Systems Management*. 2024. URL: <https://doi.org/10.1007/s40171-024-00415-x>.
149. Antony J. Fundamentals of design of experiments // *Design of Experiments for Engineers and Scientists*. 2023. P. 7–18. URL: <https://doi.org/10.1016/b978-0-443-15173-6.00010-x>.
150. Ramík J. Pairwise Comparisons Method. Cham : Springer International Publishing, 2020. URL: <https://doi.org/10.1007/978-3-030-39891-0>.
151. Transportation data visualization with a focus on freight: a literature review / Y. Ma et al. // *Transportation Planning and Technology*. 2022. P. 1–44. URL: <https://doi.org/10.1080/03081060.2022.2111430>.

Додаток А

АКТИ ВПРОВАДЖЕННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ ДОСЛІДЖЕННЯ

«ЗАТВЕРДЖУЮ»

Директор ТОВ «ВЕЛЕС-ТА»

Тетяна МАСЛОВА

«_____» 2025 р.



АКТ ВПРОВАДЖЕННЯ

Найменування пропозиції, яка впроваджена:

Методичний підхід до вибору раціональної транспортно-технологічної схеми доставки вантажів при міжнародних автомобільних перевезеннях.

Ким розроблено:

Харківський національний автомобільно-дорожній університет (ХНАДУ), кафедра транспортних технологій, автор – Севідова В.В.

Де, коли і ким впроваджено:

Методику впроваджено на підприємстві ТОВ «ВЕЛЕС-ТА» при удосконаленні процесів організації міжнародних автомобільних перевезень. Вона була використана для прийняття управлінських рішень щодо вибору раціональної логістичної схеми доставки.

Напрямки, результати, ефективність впровадження:

Розроблений методичний підхід ґрунтується на порівнянні альтернативних варіантів організації перевезень (пряма доставка, доставка через логістичний центр у країні відправлення, у країні призначення або в обох країнах). Підхід передбачає багатокритеріальну оцінку варіантів за показниками витрат, часу доставки, надійності та ризиків, включно з урахуванням військово-політичних факторів. Використання цього підходу дозволило підприємству підвищити обґрунтованість управлінських рішень, оптимізувати маршрути та логістичні схеми, скоротити непродуктивні витрати і забезпечити стабільність транспортного процесу.

«ЗАТВЕРДЖУЮ»

Директор ТОВ «ОЛЛ ТРАК ПАРТС»

Віталій СІВЕРЧУК

« 01 » вересня 2025 р.

АКТ ВПРОВАДЖЕННЯ

Найменування пропозиції, яка впроваджена:

Методика управління логістичними процесами на основі технології крос-докінгу для оптимізації обробки збірних вантажів у міжнародних автомобільних перевезеннях.

Ким розроблено:

Харківський національний автомобільно-дорожній університет (ХНАДУ), кафедра транспортних технологій, автор – Севідова В.В.

Де, коли і ким впроваджено:

Розроблена методика була впроваджена в діяльність логістичного відділу підприємства ТОВ «ОЛЛ ТРАК ПАРТС». Впровадження здійснено з метою скорочення часу обробки вантажів на логістичних терміналах, мінімізації потреби у складському зберіганні, підвищення пропускної здатності та зниження операційних витрат, пов'язаних з консолідацією та деконсолідацією партій вантажів.

Напрямки, результати, ефективність впровадження:

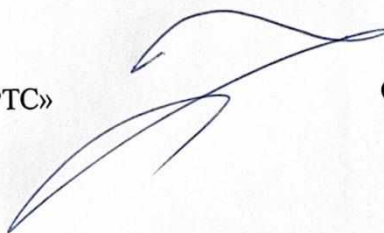
Застосування методики управління на основі технології крос-докінгу дозволило досягти суттєвих позитивних результатів у операційній діяльності підприємства. Основні результати на підприємстві, покращилося планування завантаження логістичних доків та використання транспортних засобів, що призвело до більш раціонального розподілу персоналу і техніки. Зафіксовано помітне зменшення часу непродуктивного очікування як транспортних засобів, так і обладнання терміналу, що дозволило інтенсивніше використовувати наявні потужності. Практична ефективність впровадження виражається у прямому зниженні операційних витрат на термінальну обробку вантажів та підвищенні надійності ланцюга поставок. Як наслідок, зміцнились

конкурентні переваги підприємства за рахунок надання більш швидкого та якісного логістичного сервісу клієнтам.

Висновки, зауваження, пропозиції:

Застосування методики дозволила оптимізувати роботу логістичного центру, зменшити витрати та підвищити швидкість доставки збірних вантажів.

Заступник директора
ТОВ «ОЛЛ ТРАК ПАРТС»



Олександр ЧЕРЕПАХА

«ЗАТВЕРДЖУЮ»
Перший проректор
проф. Анжеліка БАТРАКОВА
« » 2025 р.



АКТ

про впровадження в навчальний процес матеріалів
дисертаційної роботи здобувача наукового ступеня доктора філософії за
спеціальністю 275 – транспортні технології
(на автомобільному транспорті)

«Підвищення ефективності доставки вантажів в міжнародному сполученні в умовах діджиталізації»

Севідової Вікторії Віталіївни

Результати дисертаційної роботи Севідової В.В. впроваджено в навчальний процес кафедри транспортних технологій Харківського національного автомобільно-дорожнього університету.

Так, при проведенні навчального процесу зі студентами спеціальності 275 «Транспортні технології (на автомобільному транспорті)» у межах дисциплін «Організація міжнародних перевезення» та «Вантажні перевезення», розглядаються теоретичні та прикладні аспекти підвищення ефективності міжнародних автомобільних перевезень за рахунок використання імітаційного моделювання, оптимізації транспортно-технологічних схем, а також впровадження інформаційних технологій управління логістичними процесами.

При виконанні кваліфікаційних робіт здобувачами кафедри використовуються розроблені в дисертації методичні підходи до вибору раціональної транспортно-технологічної схеми доставки.

Використання матеріалів і результатів дисертаційної роботи Севідової В.В. в навчальному процесі кафедри транспортних технологій сприяє підвищенню якості підготовки здобувачів освіти, розвитку компетентностей та вдосконаленню навчально-методичного забезпечення дисциплін.

Завідуючий кафедрою транспортних технологій
к.т.н., доцент

Олексій ПАВЛЕНКО

Науковий керівник
к.т.н., доцент

Олександр КАЛІНІЧЕНКО

Додаток Б

СПИСОК ПУБЛІКАЦІЙ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ ТА ВІДОМОСТІ ПРО
АПРОБАЦІЮ РЕЗУЛЬТАТІВ ДИСЕРТАЦІЇ

Наукові праці, в яких опубліковані основні наукові результати дисертації:

1. Севідова В.В., Сальніков Є.К., Калініченко О.П. Застосування діджитал-технологій при доставці вантажу в міжнародному сполученні // *Комунальне господарство міст*. 2023. Т. 3, № 177. С. 200–205. URL: <https://doi.org/10.33042/2522-1809-2023-3-177-200-205>
2. Kalinichenko, O., Pavlenko, O., Nagorny, Y., Sevidova, V., Soldatenko, I. Determination of Conditions to Provide Transport Logistics Support Service to Aircraft at Aerodromes in Ukraine. *STUE 2023. Lecture Notes in Networks and Systems, vol 807*. Springer, Cham 2023. URL: https://doi.org/10.1007/978-3-031-46874-2_34
3. Калініченко О.П., Черпаха О.С., Севідова В.В., Сальніков Є.К. Удосконалення технологічного процесу доставки швидкопсувних вантажів у місті Харків // *Комунальне господарство міст*. 2024. Т. 4, № 185. С. 275–281. URL: <https://doi.org/10.33042/2522-1809-2024-4-185-275-281>
4. Севідова В.В., Калініченко О.П. Удосконалення технології роботи складу при міжнародних вантажних перевезеннях // *Комунальне господарство міст*. 2024. Т. 6, № 187. С. 302–307. URL: <https://doi.org/10.33042/2522-1809-2024-6-187-302-307>
5. Севідова В.В., Калініченко О.П. Визначення кількості транспортних засобів при крос-докінгу в умовах невизначеності та обмеженості ресурсів // *Комунальне господарство міст*. 2025. Т. 1, № 189. С. 475–481. URL: <https://doi.org/10.33042/2522-1809-2025-1-189-475-481>
6. Калініченко О.П., Севідова В.В. Підвищення ефективності операцій крос-докінгу для міжнародних автомобільних перевезень на основі розроблення спільних операційних графіків // *Збірник наукових праць*

Українського державного університету залізничного транспорту. 2025
№ 212. С. 331-341. URL: <https://doi.org/10.18664/1994-7852.212.2025.336554>

Наукові праці, які засвідчують апробацію матеріалів дисертації:

1. Севідова В.В., Калініченко О.П. Застосування цифрових технологій при міжнародних перевезеннях вантажів // *Комп'ютерно-інтегровані технології автоматизації технологічних процесів на транспорті та у виробництві*: матеріали Всеукр. наук.-практ. конф. здобувачів вищої освіти і молодих учених. Харків : ХНАДУ, 2021. С. 179–183.
2. Sevidova V. V., Voronova E. M. The challenges of organising international transport // *Питання сучасної модернізації науки та освіти – 2022*: збірник наукових статей Ч.1. ХНАДУ. Харків: ХНАДУ, 2022 р. С. 21 – 23
3. Sevidova V. V, Voronova E. M. Kalinichenko A. P. Applying digital technology to international transport of goods // *The 5 th International scientific and practical conference «Science, innovations and education: problems and prospects»* (December 8-10, 2021) CPN Publishing Group, Tokyo, Japan. 2021. P. 302 – 306
4. Калініченко О.П., Севідова В.В. Цифровізація міжнародних вантажних перевезень // *Матеріали до 77-ї наукової конференції професорсько-викладацького складу, аспірантів, студентів та співробітників відокремлених структурних підрозділів університету*. Київ, НТУ. 2021
5. Калініченко О.П., Севідова В.В. Проблеми організації міжнародних автомобільних перевезень // *Матеріали до 77-ї наукової конференції професорсько-викладацького складу, аспірантів, студентів та співробітників відокремлених структурних підрозділів університету*. Київ, НТУ. 2021
6. Севідова В.В., Калініченко О.П. Вплив діджитал технологій на міжнародні перевезення // *Збірник тез доповідей 79-ої Наукової конференції професорсько-викладацького складу, аспірантів, студентів та*

співробітників відокремлених структурних підрозділів університету збірник тез доповідей. Київ: НТУ, 2023. Вип. 79

7. Калініченко, О. П. Критерії вибору раціонального методу організації міжнародних автомобільних перевезень вантажів на засадах діджиталізації // *Збірник матеріалів 87-ї міжнародної науково-технічної та науково-методичної конференції університету. Секція транспортних технологій*, м. Харків, 10–13 трав. 2023 р. / Харків. нац. автомоб.-дор. ун-т. – Харків : ХНАДУ, 2023. С. 12 – 14

8. Севідова В. В., Калініченко О. П. Підвищення ефективності перевезень вантажів автомобільним транспортом в міжнародному сполученні // *Напрями розвитку технологічної системи логістики в АПВ*: зб. матер. IV Міжнар. наук.-практ. інтернет-конф., 20 квітня 2023 р. Харків: ДБТУ, 2023. С. 72 – 75

9. В. В. Севідова, О. П. Калініченко, Y. Alosynskyi, Особливості організації міжнародних автомобільних перевезень вантажів // *Розумний транспорт та інтегровані транспортні технології*: зб. матеріалів наук. робіт з міжнар. наук.-практ. конф., 21–22 листоп. 2023 р., м. Харків / М-во освіти і науки України, Харків. нац. автомоб.-дор. ун-т. – Харків : ХНАДУ, 2023. С. 76 – 78

10. Kalinichenko O., Pavlenko O., Sevidova V. Determination of Conditions to Provide Transport Logistics Support Service to Aircraft at Aerodromes in Ukraine // *Збірник матеріалів Міжнародної науково-технічної конференції «Розумний транспорт та інтегровані транспортні технології»*, Х:ХНАДУ, 2023 р. 3с

11. Sevidova V. V, Salnikov Ye.K Kalinichenko O. P. The impact of digitalization on freight transportation // *«Topical aspects of modern scientific research»*: materials of conference (March 21-23, 2024) CPN Publishing Group, Tokyo, Japan. 2024, P.114 – 118

12. В. В. Севідова, О. П. Калініченко. Впровадження інновацій в області міжнародних перевезень у світі // *Сучасні проблеми функціонування*

логістичних систем. Сталий розвиток транспортних систем: наука і практика : зб. тез доп. міжнар. наук.-практ. конф., 25–26 листоп. 2024 р. / Харків. нац. автомоб.-дор. ун-т. – Харків, 2024. С. 201–204

13. Sevidova V.V., Kalinichenko O.P. The role of digitalization in international cargo transportation // *Інтелектуальні транспортні технології: Тези доповідей 25 –27 листопада 2024 р. Харків: УкрДУЗТ, 2024 С. 177–178*

Додаток В

ЛІСТИНГ ПРОГРАМИ «LOGISTICSSIM» (ФРАГМЕНТ)

```

from tkinter import ttk, filedialog, messagebox
import json
import math
import os
import csv

import tkinter
# --- Додано імпорти для Pillow ---
from PIL import Image, ImageTk
# -----

# Define a default directory for saving/loading files
DEFAULT_SAVE_DIR = os.path.join(os.path.expanduser("~"), "LogisticsAppData")
if not os.path.exists(DEFAULT_SAVE_DIR):
    os.makedirs(DEFAULT_SAVE_DIR)

class LogisticsSimulatorApp:
    def __init__(self, root):
        self.root = root
        self.root.title("Симулятор витрат та часу міжнародної доставки")

        style = ttk.Style()
        style.theme_use('clam')

    def _create_scrollable_frame(self, parent_frame):
        canvas = tkinter.Canvas(parent_frame, borderwidth=0)
        scrollbar = ttk.Scrollbar(parent_frame, orient="vertical", command=canvas.yview)
        scrollable_frame = ttk.Frame(canvas)
        scrollable_frame.bind("<Configure>", lambda e: canvas.configure(scrollregion=canvas.bbox("all")))
        canvas.create_window((0, 0), window=scrollable_frame, anchor="nw")
        canvas.configure(yscrollcommand=scrollbar.set)
        canvas.pack(side="left", fill="both", expand=True)
        scrollbar.pack(side="right", fill="y")
        return scrollable_frame

    def _create_cost_tab(self):
        main_pane = ttk.PanedWindow(self.cost_frame, orient=tkinter.VERTICAL)
        main_pane.pack(fill=tkinter.BOTH, expand=True)
        input_outer_frame = ttk.LabelFrame(main_pane, text="Вхідні дані для розрахунку витрат")
        main_pane.add(input_outer_frame, weight=1)
        input_frame = self._create_scrollable_frame(input_outer_frame)
        groups = {
            "Загальні дані": [
                ("quantity", "Кількість вантажу (од.)", "_"), ("weight_per_unit", "Вага од. вантажу (кг)", "_"),
                ("volume_per_unit", "Об'єм од. вантажу (м³)", "_"), ("value_per_unit", "Вартість од. вантажу

```

```

(грош.од.)", "_"),
    ("distance_total", "Загальна відстань (Пряма, км)", "_"), ("distance_sender_lc1", "Відстань
Відправник -> ЛЦ Відправлення (км)", "_"),
    ("distance_lc1_lc2", "Відстань ЛЦ Відправлення -> ЛЦ Призначення (км)", "_"),
("distance_lc2_receiver", "Відстань ЛЦ Призначення -> Отримувач (км)", "_"),
    ("distance_sender_lc2", "Відстань Відправник -> ЛЦ Призначення (км)", "_"),
("distance_lc1_receiver", "Відстань ЛЦ Відправлення -> Отримувач (км)", "_"),
    ],
    "Витрати на оформлення та підготовку": [
        ("cost_application_fee", "Витрати на оформлення заявки", "_"),
        ("cost_documentation_per_unit", "Витрати на оформлення документів (за од.)", "_"),
        ("cost_batch_formation_direct_per_kg", "Витрати на формування партії (Прямий, за кг)",
" _"),
        ("cost_consolidation_per_kg", "Витрати на консолідацію (ЛЦ, за кг)", "_"),
        ("cost_packing_per_unit", "Витрати на пакування (за од.)", "_"),
        ("cost_marking_per_unit", "Витрати на маркування (за од.)", "_"),
        ("cost_quality_check_per_unit", "Витрати на перевірку якості (за од.)", "_"),
    ],
    "Витрати на навантаження/розвантаження": [
        ("cost_loading_sender_per_kg", "Витрати на навантаження (Відправник, за кг)", "_"),
        ("cost_unloading_receiver_per_kg", "Витрати на розвантаження (Отримувач, за кг)", "_"),
        ("cost_loading_lc_per_kg", "Витрати на навантаження (ЛЦ, за кг)", "_"),
        ("cost_unloading_lc_per_kg", "Витрати на розвантаження (ЛЦ, за кг)", "_"),
    ],
    "Витрати на транспортування": [
        ("cost_transport_per_km", "Витрати на транспортування (за км)", "_"),
        ("cost_transport_insurance_percent", "Витрати на страхування (% від вартості)", "_"),
    ],
    "Витрати в логістичних центрах (ЛЦ)": [ ("cost_lc_handling_crossdock_per_kg", "Витрати на
обробку (ЛЦ, крос-докінг, за кг)", "_"), ],
    "Митні та інші витрати": [
        ("cost_customs_clearance_export_fix", "Витрати на митне оформлення (Експорт)", "_"),
        ("cost_customs_clearance_import_fix", "Витрати на митне оформлення (Імпорт)", "_"),
        ("cost_customs_duties_percent", "Витрати на митні збори (% від вартості)", "_"),
        ("cost_war_risk_percent_value", "Витрати на воєнні ризики (% від вартості)", "_"),
        ("cost_other_unexpected_percent", "Інші/непередбачені витрати (% від загальних)", "_"),
    ]
}
row_num = 0
for group_name, fields in groups.items():
    group_label = ttk.Label(input_frame, text=group_name, font=('Arial', 10, 'bold'))
    group_label.grid(row=row_num, column=0, columnspan=2, sticky='w', pady=(10, 2)); row_num +=
1
    for key, label_text, default_value in fields:
        label = ttk.Label(input_frame, text=label_text + ":")
        label.grid(row=row_num, column=0, sticky='w', padx=5, pady=2)
        var = tkinter.StringVar(value=default_value)
        entry = ttk.Entry(input_frame, textvariable=var, width=15)
        entry.grid(row=row_num, column=1, sticky='ew', padx=5, pady=2)
        self.input_vars[key] = var; row_num += 1

```

```

input_button_frame = ttk.Frame(input_outer_frame)
input_button_frame.pack(fill=tkinter.X, pady=(10,5))
save_button = ttk.Button(input_button_frame, text="Зберегти вхідні дані",
command=self.save_data)
save_button.pack(side=tkinter.LEFT, padx=5)
load_button = ttk.Button(input_button_frame, text="Завантажити вхідні дані",
command=self.load_data)
load_button.pack(side=tkinter.LEFT, padx=5)
result_frame = ttk.LabelFrame(main_pane, text="Результати розрахунку витрат")
main_pane.add(result_frame, weight=2)
calc_button_frame = ttk.Frame(result_frame)
calc_button_frame.pack(fill=tkinter.X, pady=5)
calc_button = ttk.Button(calc_button_frame, text="Розрахувати витрати",
command=self.calculate_costs)
calc_button.pack(side=tkinter.LEFT, padx=5)
save_results_button = ttk.Button(calc_button_frame, text="Зберегти результати витрат (CSV)",
command=self.save_cost_results)
save_results_button.pack(side=tkinter.LEFT, padx=5)
columns = ("component", "scenario1", "scenario2", "scenario3", "scenario4")
self.cost_tree = ttk.Treeview(result_frame, columns=columns, show='headings')
self.cost_tree.heading("component", text="Складова витрат")
self.cost_tree.heading("scenario1", text="Сценарій 1 (Прямий)")
self.cost_tree.heading("scenario2", text="Сценарій 2 (ЛЦ Відправлення)")
self.cost_tree.heading("scenario3", text="Сценарій 3 (ЛЦ Призначення)")
self.cost_tree.heading("scenario4", text="Сценарій 4 (Обидва ЛЦ)")
self.cost_tree.column("component", width=300, anchor=tkinter.W)
self.cost_tree.column("scenario1", width=140, anchor=tkinter.E)
self.cost_tree.column("scenario2", width=140, anchor=tkinter.E)
self.cost_tree.column("scenario3", width=140, anchor=tkinter.E)
self.cost_tree.column("scenario4", width=140, anchor=tkinter.E)
tree_scrollbar = ttk.Scrollbar(result_frame, orient="vertical", command=self.cost_tree.yview)
self.cost_tree.configure(yscrollcommand=tree_scrollbar.set)
tree_scrollbar.pack(side=tkinter.RIGHT, fill=tkinter.Y)
self.cost_tree.pack(fill=tkinter.BOTH, expand=True, side=tkinter.BOTTOM)

def _create_time_tab(self):
    main_pane = ttk.PanedWindow(self.time_frame, orient=tkinter.VERTICAL)
    main_pane.pack(fill=tkinter.BOTH, expand=True)
    input_outer_frame = ttk.LabelFrame(main_pane, text="Вхідні дані для розрахунку часу")
    main_pane.add(input_outer_frame, weight=1)
    input_frame = self._create_scrollable_frame(input_outer_frame)
    row_num = 0
    common_data_label = ttk.Label(input_frame, text="Базові дані (з вкладки Витрат):", font=('Arial',
10, 'italic'))
    common_data_label.grid(row=row_num, column=0, columnspan=2, sticky='w', pady=(10, 2));
    row_num += 1
    common_data_display_names = {
        "quantity": "Кількість вантажу (од.)", "weight_per_unit": "Вага од. вантажу (кг)",
        "distance_total": "Загальна відстань (Пряма, км)", "distance_sender_lc1": "Відст. Відправник ->
ЛЦ Відпр. (км)",

```

```

"distance_lc1_lc2": "Відст. ЛЦ Відпр. -> ЛЦ Призн. (км)", "distance_lc2_receiver": "Відст. ЛЦ
Призн. -> Отримувач (км)",
"distance_sender_lc2": "Відст. Відправник -> ЛЦ Призн. (км)", "distance_lc1_receiver": "Відст.
ЛЦ Відпр. -> Отримувач (км)"
}
for key, display_text in common_data_display_names.items():
    if key in self.input_vars:
        label = ttk.Label(input_frame, text=f"{display_text}:")
        label.grid(row=row_num, column=0, sticky='w', padx=5, pady=1)
        val_label = ttk.Label(input_frame, textvariable=self.input_vars[key], relief="sunken", width=15)
        val_label.grid(row=row_num, column=1, sticky='ew', padx=5, pady=1); row_num += 1
groups = {
    "Параметри розрахунку часу": [
        ("time_avg_speed_kmh", "Середня швидкість руху (км/год)", "_"),
        ("time_batch_formation_direct_h", "Формування партії (Прямий, год)", "_"),
        ("time_loading_sender_h_per_kg", "Час навантаження у відправника (год/кг)", "_"),
        ("time_unloading_receiver_h_per_kg", "Час розвантаження у отримувача (год/кг)",
"0.0001"),
        ("time_loading_lc_h_per_kg", "Час навантаження в ЛЦ (год/кг)", "_"),
        ("time_unloading_lc_h_per_kg", "Час розвантаження в ЛЦ (год/кг)", "_"),
        ("time_documentation_h", "Час на оформлення документів (год, фікс.)", "_"),
        ("time_customs_export_h", "Час на митне оформлення (Експорт, год)", "_"),
        ("time_customs_import_h", "Час на митне оформлення (Імпорт, год)", "_"),
        ("time_lc_crossdock_h", "Час обробки в ЛЦ (крос-докінг, год, фікс.)", "_"),
        ("time_border_crossing_h", "Час на перетин кордону (додатково до митниці, год)", "_"),
        ("time_driver_work_hours_day", "Робочих годин водія на день", "_"),
        ("time_driver_rest_hours_mandatory", "Обов'язковий відпочинок водія на день (год)", "_"),
        ("time_unexpected_delay_percent", "Можливі затримки (% від загального часу)", "_"),
    ]
}
for group_name, fields in groups.items():
    if fields:
        group_label = ttk.Label(input_frame, text=group_name, font=('Arial', 10, 'bold'))
        group_label.grid(row=row_num, column=0, columnspan=2, sticky='w', pady=(10, 2)); row_num
+= 1
        for key, label_text, default_value in fields:
            label = ttk.Label(input_frame, text=label_text + ":")
            label.grid(row=row_num, column=0, sticky='w', padx=5, pady=2)
            var = tkinter.StringVar(value=default_value)
            entry = ttk.Entry(input_frame, textvariable=var, width=15)
            entry.grid(row=row_num, column=1, sticky='ew', padx=5, pady=2)
            self.time_input_vars[key] = var; row_num += 1
result_frame = ttk.LabelFrame(main_pane, text="Результати розрахунку часу")
main_pane.add(result_frame, weight=2)
calc_button_frame = ttk.Frame(result_frame)
calc_button_frame.pack(fill=tkinter.X, pady=5)
calc_button = ttk.Button(calc_button_frame, text="Розрахувати час",
command=self.calculate_time)
calc_button.pack(side=tkinter.LEFT, padx=5)
save_results_button = ttk.Button(calc_button_frame, text="Зберегти результати часу (CSV)",

```

```

command=self.save_time_results)
    save_results_button.pack(side=tkinter.LEFT, padx=5)
    columns = ("component", "scenario1", "scenario2", "scenario3", "scenario4")
    self.time_tree = ttk.Treeview(result_frame, columns=columns, show='headings')
    self.time_tree.heading("component", text="Етап доставки")
    self.time_tree.heading("scenario1", text="Сценарій 1 (Прямий, год)")
    self.time_tree.heading("scenario2", text="Сценарій 2 (ЛЦ Відпр., год)")
    self.time_tree.heading("scenario3", text="Сценарій 3 (ЛЦ Призн., год)")
    self.time_tree.heading("scenario4", text="Сценарій 4 (Обидва ЛЦ, год)")
    self.time_tree.column("component", width=300, anchor=tkinter.W)
    self.time_tree.column("scenario1", width=140, anchor=tkinter.E)
    self.time_tree.column("scenario2", width=140, anchor=tkinter.E)
    self.time_tree.column("scenario3", width=140, anchor=tkinter.E)
    self.time_tree.column("scenario4", width=140, anchor=tkinter.E)
    tree_scrollbar = ttk.Scrollbar(result_frame, orient="vertical", command=self.time_tree.yview)
    self.time_tree.configure(yscrollcommand=tree_scrollbar.set)
    tree_scrollbar.pack(side=tkinter.RIGHT, fill=tkinter.Y)
    self.time_tree.pack(fill=tkinter.BOTH, expand=True, side=tkinter.BOTTOM)

def _get_input_values(self, var_dict):
    values = {}
    try:
        for key, var in var_dict.items():
            values[key] = float(var.get().replace(',', '.'))
    except ValueError as e:
        messagebox.showerror("Помилка вводу", f"Будь ласка, введіть дійсні числа у всі поля.\nВикористовуйте крапку як десятковий роздільник.\nПомилка: {e}")
    return None
    return values

def calculate_costs(self):
    inputs = self._get_input_values(self.input_vars)
    if inputs is None: return
    for i in self.cost_tree.get_children(): self.cost_tree.delete(i)
    total_weight = inputs['quantity'] * inputs['weight_per_unit']
    total_value = inputs['quantity'] * inputs['value_per_unit']
    results = {i: {} for i in range(1, 5)}
    results[1]['app_fee'] = results[2]['app_fee'] = results[3]['app_fee'] = results[4]['app_fee'] =
inputs['cost_application_fee']
    results[1]['doc_per_unit'] = results[2]['doc_per_unit'] = results[3]['doc_per_unit'] =
results[4]['doc_per_unit'] = inputs['cost_documentation_per_unit'] * inputs['quantity']
    results[1]['customs_exp_fix'] = results[2]['customs_exp_fix'] = results[3]['customs_exp_fix'] =
results[4]['customs_exp_fix'] = inputs['cost_customs_clearance_export_fix']
    results[1]['customs_imp_fix'] = results[2]['customs_imp_fix'] = results[3]['customs_imp_fix'] =
results[4]['customs_imp_fix'] = inputs['cost_customs_clearance_import_fix']
    results[1]['customs_duties'] = results[2]['customs_duties'] = results[3]['customs_duties'] =
results[4]['customs_duties'] = total_value * (inputs['cost_customs_duties_percent'] / 100.0)
    results[1]['insurance'] = results[2]['insurance'] = results[3]['insurance'] = results[4]['insurance'] =
total_value * (inputs['cost_transport_insurance_percent'] / 100.0)
    war_risk_cost = total_value * (inputs.get('cost_war_risk_percent_value', 0.0) / 100.0)

```

```

    results[1]['war_risk'] = results[2]['war_risk'] = results[3]['war_risk'] = results[4]['war_risk'] =
war_risk_cost
    results[1]['packing'] = results[2]['packing'] = results[3]['packing'] = results[4]['packing'] =
inputs['cost_packing_per_unit'] * inputs['quantity']
    results[1]['marking'] = results[2]['marking'] = results[3]['marking'] = results[4]['marking'] =
inputs['cost_marking_per_unit'] * inputs['quantity']
    results[1]['quality_check'] = results[2]['quality_check'] = results[3]['quality_check'] =
results[4]['quality_check'] = inputs['cost_quality_check_per_unit'] * inputs['quantity']
    results[1]['loading_sender'] = results[2]['loading_sender'] = results[3]['loading_sender'] =
results[4]['loading_sender'] = inputs['cost_loading_sender_per_kg'] * total_weight
    results[1]['unloading_receiver'] = results[2]['unloading_receiver'] = results[3]['unloading_receiver'] =
results[4]['unloading_receiver'] = inputs['cost_unloading_receiver_per_kg'] * total_weight
    results[1]['batch_formation_direct'] = inputs['cost_batch_formation_direct_per_kg'] * total_weight
    results[1]['transport'] = inputs['cost_transport_per_km'] * inputs['distance_total']
    results[2]['transport'] = (inputs['cost_transport_per_km'] * inputs['distance_sender_lc1']) +
(inputs['cost_transport_per_km'] * inputs['distance_lc1_receiver'])
    results[2]['consolidation'] = inputs['cost_consolidation_per_kg'] * total_weight
    results[2]['unloading_lc1'] = inputs['cost_unloading_lc_per_kg'] * total_weight
    results[2]['lc1_handling'] = inputs['cost_lc_handling_crossdock_per_kg'] * total_weight
    results[2]['loading_lc1'] = inputs['cost_loading_lc_per_kg'] * total_weight
    results[3]['transport'] = (inputs['cost_transport_per_km'] * inputs['distance_sender_lc2']) +
(inputs['cost_transport_per_km'] * inputs['distance_lc2_receiver'])
    results[3]['unloading_lc2'] = inputs['cost_unloading_lc_per_kg'] * total_weight
    results[3]['lc2_handling'] = inputs['cost_lc_handling_crossdock_per_kg'] * total_weight
    results[3]['loading_lc2'] = inputs['cost_loading_lc_per_kg'] * total_weight
    results[4]['transport'] = (inputs['cost_transport_per_km'] * inputs['distance_sender_lc1']) +
(inputs['cost_transport_per_km'] * inputs['distance_lc1_lc2']) + (inputs['cost_transport_per_km'] *
inputs['distance_lc2_receiver'])
    results[4]['consolidation'] = inputs['cost_consolidation_per_kg'] * total_weight
    results[4]['unloading_lc1'] = inputs['cost_unloading_lc_per_kg'] * total_weight
    results[4]['lc1_handling'] = inputs['cost_lc_handling_crossdock_per_kg'] * total_weight
    results[4]['loading_lc1'] = inputs['cost_loading_lc_per_kg'] * total_weight
    results[4]['unloading_lc2'] = inputs['cost_unloading_lc_per_kg'] * total_weight
    results[4]['lc2_handling'] = inputs['cost_lc_handling_crossdock_per_kg'] * total_weight
    results[4]['loading_lc2'] = inputs['cost_loading_lc_per_kg'] * total_weight
    cost_components_map = {
        'app_fee': "Витрати на оформлення заявки", 'doc_per_unit': "Витрати на оформлення
документів (за од.)",
        'batch_formation_direct': "Витрати на формування партії (Прямий)", 'consolidation': "Витрати
на консолідацію (в ЛЦ)",
        'packing': "Витрати на пакування", 'marking': "Витрати на маркування", 'quality_check':
"Витрати на перевірку якості",
        'loading_sender': "Витрати на навантаження (Відправник)", 'transport': "Витрати на
транспортування",
        'unloading_lc1': "Витрати на розвантаження (ЛЦ Відправлення)", 'lc1_handling': "Витрати на
обробку (ЛЦ Відправлення)", 'loading_lc1': "Витрати на навантаження (ЛЦ Відправлення)",
        'unloading_lc2': "Витрати на розвантаження (ЛЦ Призначення)", 'lc2_handling': "Витрати на
обробку (ЛЦ Призначення)", 'loading_lc2': "Витрати на навантаження (ЛЦ Призначення)",
        'unloading_receiver': "Витрати на розвантаження (Отримувач)", 'customs_exp_fix': "Витрати на
митне оформлення (Експорт)",

```

```

        'customs_imp_fix': "Витрати на митне оформлення (Імпорт)", 'customs_duties': "Витрати на
митні збори (%)", 'insurance': "Витрати на страхування", 'war_risk': "Витрати на воєнні ризики",
    }
    totals = [0.0] * 5
    display_order = [
        'app_fee', 'doc_per_unit', 'batch_formation_direct', 'consolidation', 'packing', 'marking',
'quality_check',
        'loading_sender', 'transport', 'unloading_lc1', 'lc1_handling', 'loading_lc1', 'unloading_lc2',
'lc2_handling',
        'loading_lc2', 'unloading_receiver', 'customs_exp_fix', 'customs_imp_fix', 'customs_duties',
'insurance', 'war_risk'
    ]
    for key in display_order:
        if key not in cost_components_map: continue
        name = cost_components_map[key]
        values = [name]
        has_value = False
        for i in range(1, 5):
            cost = results[i].get(key, 0.0)
            values.append(f"{cost:.2f}")
            totals[i] += cost
            if cost > 0.001: has_value = True
        if has_value: self.cost_tree.insert("", tkinter.END, values=values)
    intermediate_totals = [f"{t:.2f}" for t in totals[1:]]
    self.cost_tree.insert("", tkinter.END, values=["ПРОМІЖНА СУМА", *intermediate_totals],
tags=('total_row',))
    unexpected_costs = [0.0] * 5
    unexpected_percent = inputs.get('cost_other_unexpected_percent', 0.0) / 100.0
    for i in range(1, 5):
        unexpected_costs[i] = totals[i] * unexpected_percent
        totals[i] += unexpected_costs[i]
    unexpected_values = [f"{c:.2f}" for c in unexpected_costs[1:]]
    self.cost_tree.insert("", tkinter.END, values=["Непередбачені витрати", *unexpected_values],
tags=('total_row',))
    total_values = [f"{t:.2f}" for t in totals[1:]]
    self.cost_tree.insert("", tkinter.END, values=["ЗАГАЛЬНІ ВИТРАТИ", *total_values], tags=('total_row',
'bold_row'))
    self.cost_tree.tag_configure('total_row', background='lightgrey')
    self.cost_tree.tag_configure('bold_row', font=('Arial', 9, 'bold'))

    def calculate_time(self):
        cost_inputs = self._get_input_values(self.input_vars)
        time_inputs = self._get_input_values(self.time_input_vars)
        if cost_inputs is None or time_inputs is None: return
        for i in self.time_tree.get_children(): self.time_tree.delete(i)
        total_weight = cost_inputs['quantity'] * cost_inputs['weight_per_unit']
        avg_speed = time_inputs['time_avg_speed_kmh']
        if avg_speed <= 0: messagebox.showerror("Помилка вводу", "Середня швидкість має бути більше
нуля."); return
        driver_work_h = time_inputs['time_driver_work_hours_day']

```

```

driver_rest_h = time_inputs['time_driver_rest_hours_mandatory']
if driver_work_h <= 0 or driver_rest_h < 0: messagebox.showerror("Помилка вводу", "Час роботи
та відпочинку водія мають бути коректними."); return
total_cycle_h = driver_work_h + driver_rest_h
if total_cycle_h <= 0: total_cycle_h = 24
def calculate_driving_time_with_rest(distance):
    if distance <= 0: return 0
    driving_hours_pure = distance / avg_speed
    full_work_days = math.floor(driving_hours_pure / driver_work_h)
    time_for_full_days = full_work_days * total_cycle_h
    remaining_driving_hours = driving_hours_pure % driver_work_h
    total_time = time_for_full_days + remaining_driving_hours
    return total_time
results = {i: {} for i in range(1, 5)}
results[1]['doc_time'] = results[2]['doc_time'] = results[3]['doc_time'] = results[4]['doc_time'] =
time_inputs['time_documentation_h']
results[1]['customs_exp_time'] = results[2]['customs_exp_time'] = results[3]['customs_exp_time'] =
results[4]['customs_exp_time'] = time_inputs['time_customs_export_h']
results[1]['customs_imp_time'] = results[2]['customs_imp_time'] = results[3]['customs_imp_time'] =
results[4]['customs_imp_time'] = time_inputs['time_customs_import_h']
results[1]['border_cross_time'] = results[2]['border_cross_time'] = results[3]['border_cross_time'] =
results[4]['border_cross_time'] = time_inputs['time_border_crossing_h']
results[1]['loading_sender_time'] = results[2]['loading_sender_time'] =
results[3]['loading_sender_time'] = results[4]['loading_sender_time'] =
time_inputs['time_loading_sender_h_per_kg'] * total_weight
results[1]['unloading_receiver_time'] = results[2]['unloading_receiver_time'] =
results[3]['unloading_receiver_time'] = results[4]['unloading_receiver_time'] =
time_inputs['time_unloading_receiver_h_per_kg'] * total_weight
results[1]['batch_formation_direct_time'] = time_inputs['time_batch_formation_direct_h']
results[1]['driving_time'] = calculate_driving_time_with_rest(cost_inputs['distance_total'])
results[2]['driving_time'] = calculate_driving_time_with_rest(cost_inputs['distance_sender_lc1']) +
calculate_driving_time_with_rest(cost_inputs['distance_lc1_receiver'])
results[2]['unloading_lc1_time'] = time_inputs['time_unloading_lc_h_per_kg'] * total_weight
results[2]['lc1_handling_time'] = time_inputs['time_lc_crossdock_h']
results[2]['loading_lc1_time'] = time_inputs['time_loading_lc_h_per_kg'] * total_weight
results[3]['driving_time'] = calculate_driving_time_with_rest(cost_inputs['distance_sender_lc2']) +
calculate_driving_time_with_rest(cost_inputs['distance_lc2_receiver'])
results[3]['unloading_lc2_time'] = time_inputs['time_unloading_lc_h_per_kg'] * total_weight
results[3]['lc2_handling_time'] = time_inputs['time_lc_crossdock_h']
results[3]['loading_lc2_time'] = time_inputs['time_loading_lc_h_per_kg'] * total_weight
results[4]['driving_time'] = calculate_driving_time_with_rest(cost_inputs['distance_sender_lc1']) +
calculate_driving_time_with_rest(cost_inputs['distance_lc1_lc2']) +
calculate_driving_time_with_rest(cost_inputs['distance_lc2_receiver'])
results[4]['unloading_lc1_time'] = time_inputs['time_unloading_lc_h_per_kg'] * total_weight
results[4]['lc1_handling_time'] = time_inputs['time_lc_crossdock_h']
results[4]['loading_lc1_time'] = time_inputs['time_loading_lc_h_per_kg'] * total_weight
results[4]['unloading_lc2_time'] = time_inputs['time_unloading_lc_h_per_kg'] * total_weight
results[4]['lc2_handling_time'] = time_inputs['time_lc_crossdock_h']
results[4]['loading_lc2_time'] = time_inputs['time_loading_lc_h_per_kg'] * total_weight
time_components_map = {

```

```

'doc_time': "Час на оформлення документів", 'batch_formation_direct_time': "Час на
формування партії (Прямий)",
'loading_sender_time': "Час на навантаження (Відправник)", 'driving_time': "Час у дорозі (з
відпочинком)",
'unloading_lc1_time': "Час на розвантаження (ЛЦ Відправлення)", 'lc1_handling_time': "Час на
обробку (ЛЦ Відправлення)", 'loading_lc1_time': "Час на навантаження (ЛЦ Відправлення)",
'border_cross_time': "Час на перетин кордону", 'customs_exp_time': "Час на митне
оформлення (Експорт)", 'customs_imp_time': "Час на митне оформлення (Імпорт)",
'unloading_lc2_time': "Час на розвантаження (ЛЦ Призначення)", 'lc2_handling_time': "Час на
обробку (ЛЦ Призначення)", 'loading_lc2_time': "Час на навантаження (ЛЦ Призначення)",
'unloading_receiver_time': "Час на розвантаження (Отримувач)",
messagebox.showinfo("Збереження успішне", f"Дані збережено у файл:\n{filepath}")
except Exception as e: messagebox.showerror("Помилка збереження", f"Не вдалося зберегти
файл.\nПомилка: {e}")
.....
def load_data(self):
    filepath = filedialog.askopenfilename( initialdir=DEFAULT_SAVE_DIR, title="Завантажити вхідні
дані", filetypes=[("JSON files", "*.json"), ("All files", "*.*")] )
    if not filepath: return
    try:
        with open(filepath, 'r', encoding='utf-8') as f: loaded_data = json.load(f)
        loaded_count = 0; missed_keys = []
        all_vars = {**self.input_vars, **self.time_input_vars}
        present_keys_in_code = set(all_vars.keys()); loaded_keys = set(loaded_data.keys())
        for key in present_keys_in_code.intersection(loaded_keys):
            all_vars[key].set(loaded_data[key]); loaded_count +=1
        missing_in_file = present_keys_in_code - loaded_keys
        if missing_in_file: missed_keys.extend([f"(немає у файлі): {key}" for key in missing_in_file])
        obsolete_in_file = loaded_keys - present_keys_in_code
        if obsolete_in_file: missed_keys.extend([f"(застарілий у файлі): {key}" for key in
obsolete_in_file])
        if missed_keys:
            messagebox.showwarning("Завантаження завершено з попередженнями", f"Дані
завантажено з файлу:\n{filepath}\nЗавантажено {loaded_count} актуальних значень.\nРозбіжності
ключів:\n" + "\n".join(missed_keys))
        else: messagebox.showinfo("Завантаження успішне", f"Дані успішно завантажено з
файлу:\n{filepath}\nЗавантажено {loaded_count} значень.")
        except FileNotFoundError: messagebox.showerror("Помилка завантаження", f"Файл не
знайдено:\n{filepath}")
        except json.JSONDecodeError: messagebox.showerror("Помилка завантаження", f"Файл має
неправильний формат JSON:\n{filepath}")
        except Exception as e: messagebox.showerror("Помилка завантаження", f"Не вдалося
завантажити файл.\nПомилка: {e}")

def _save_treeview_to_csv(self, treeview_widget, file_path):
    try:
        with open(file_path, 'w', newline="", encoding='utf-8-sig') as f:
            writer = csv.writer(f, delimiter=';')
            headings = [treeview_widget.heading(col)['text'] for col in treeview_widget['columns']]
            writer.writerow(headings)

```

```

        for item_id in treeview_widget.get_children(""):
            row_values = treeview_widget.item(item_id)['values']
            writer.writerow(row_values)
        return True
    except Exception as e: messagebox.showerror("Помилка збереження CSV", f"Не вдалося зберегти
файл.\nПомилка: {e}"); return False

def save_cost_results(self):
    if not self.cost_tree.get_children(): messagebox.showwarning("Немає даних", "Спочатку
розрахуйте витрати, щоб зберегти результати."); return
    filepath = filedialog.asksaveasfilename( initialdir=DEFAULT_SAVE_DIR, title="Зберегти результати
розрахунку витрат", defaultextension=".csv", filetypes=[("CSV файли (*.csv)", "*.csv"), ("All files",
"*. *")])
    if not filepath: return
    if self._save_treeview_to_csv(self.cost_tree, filepath): messagebox.showinfo("Збереження
успішне", f"Результати розрахунку витрат збережено у файл:\n{filepath}")

def save_time_results(self):
    if not self.time_tree.get_children(): messagebox.showwarning("Немає даних", "Спочатку
розрахуйте час, щоб зберегти результати."); return
    filepath = filedialog.asksaveasfilename( initialdir=DEFAULT_SAVE_DIR, title="Зберегти результати
розрахунку часу", defaultextension=".csv", filetypes=[("CSV файли (*.csv)", "*.csv"), ("All files", "*. *")])
    if not filepath: return
    if self._save_treeview_to_csv(self.time_tree, filepath): messagebox.showinfo("Збереження
успішне", f"Результати розрахунку часу збережено у файл:\n{filepath}")

# --- Запуск програми ---
if __name__ == "__main__":
    # Перед запуском переконайтесь, що встановлено Pillow: pip install Pillow
    # Також переконайтесь, що файл зображення (напр., international_transport.png)
    # знаходиться в тій самій папці, що й цей скрипт.
    root = tkinter.Tk( )
    app = LogisticsSimulatorApp(root)
    root.mainloop()

```

Додаток Г

ЛІСТИНГ ПРОГРАМИ «СИМУЛЯТОР КРОС-ДОКІНГУ» (ФРАГМЕНТ)

```

import tkinter as tk
from tkinter import ttk, messagebox, scrolledtext, simpledialog, filedialog
import heapq
import sys
import traceback
import math
import json
import datetime
from enum import Enum, auto

# --- Функції Валідації (Розміщені Глобально) ---
def validate_positive_float(entry_widget_or_val_str, field_name, allow_zero=False, positive_only=False):
    widget_mode = isinstance(entry_widget_or_val_str, tk.Widget)
    if widget_mode: val_str = entry_widget_or_val_str.get().strip()
    else: val_str = str(entry_widget_or_val_str).strip()
    if val_str.lower() == 'inf':
        if field_name not in ["Дедлайн відправлення", "Дедлайн"]: raise ValueError(f"'inf' недопустиме для '{field_name}'")
        return float('inf')
    try:
        value = float(val_str)
        if positive_only and value <= 1e-9: raise ValueError(f"'{field_name}' має бути > 0.")
        if not allow_zero and abs(value) < 1e-9: raise ValueError(f"'{field_name}' не 0.")
        if value < -1e-9: raise ValueError(f"'{field_name}' >= 0.")
        return value
    except ValueError as e:
        error_msg = f"'{field_name}': {val_str}\n{e}"
        if widget_mode: messagebox.showerror("Помилка Вводу", error_msg)
        raise ValueError(error_msg) from e
    return None

def validate_positive_int(entry_widget_or_val_str, field_name, allow_zero=False, min_val=None,
max_val=None):
    widget_mode = isinstance(entry_widget_or_val_str, tk.Widget)

```

```

if widget_mode: val_str = entry_widget_or_val_str.get().strip()
else: val_str = str(entry_widget_or_val_str).strip()
try:
    value = int(val_str)
    if not allow_zero and value <= 0: raise ValueError(f"{field_name} > 0.")
    if allow_zero and value < 0: raise ValueError(f"{field_name} >= 0.")
    if min_val is not None and value < min_val: raise ValueError(f"{field_name} >= {min_val}.")
    if max_val is not None and value > max_val: raise ValueError(f"{field_name} <= {max_val}.")
    return value
except ValueError as e:
    error_msg = f"'{field_name}': {val_str}\n{e}"
    if widget_mode: messagebox.showerror("Помилка Вводу", error_msg)
    raise ValueError(error_msg) from e
return None

# --- Допоміжні класи та Enum ---
class TruckState(Enum): ARRIVED_INBOUND=auto(); WAITING_UNLOAD_DOCK=auto();
WAITING_UNLOAD_RESOURCES=auto(); UNLOADING=auto();
WAITING_PROCESSING_RESOURCES=auto(); PROCESSING=auto(); PENDING_DEPENDENCIES=auto();
WAITING_LOAD_DOCK=auto(); WAITING_LOAD_RESOURCES=auto(); LOADING=auto();
COMPLETED=auto(); FAILED=auto()

# --- Класи даних () ---
class Truck:
    def __init__(self, truck_id, arrival_time, processing_time_estimate, priority=5, material_cost=0.0,
other_cost=0.0):
        self.id = str(truck_id); self.arrival_time = float(arrival_time); self.processing_time_estimate =
float(processing_time_estimate); self.priority = int(priority); self.material_cost = float(material_cost);
self.other_cost = float(other_cost); self.start_queue_time = arrival_time; self.start_service_time = None;
self.finish_service_time = None; self.assigned_dock = None
    def to_dict(self): return
{'id':self.id,'arrival_time':self.arrival_time,'processing_time_estimate':self.processing_time_estimate,'pri
ority':self.priority,'material_cost':self.material_cost,'other_cost':self.other_cost,'type':self.__class__.__na
me__}

class InboundTruck(Truck):

```

```

    def __init__(self, truck_id, arrival_time, processing_time_estimate, priority=5, material_cost=0.0,
other_cost=0.0): super().__init__(truck_id, arrival_time, processing_time_estimate, priority,
material_cost, other_cost); self.is_unloaded = False

    def __repr__(self): return f"In(ID:{self.id}, Arr:{self.arrival_time:.2f},
Proc:{self.processing_time_estimate:.2f}, Prio:{self.priority})"

    def get_details_tuple(self): return (self.id, "Вхідний", f"{self.arrival_time:.2f}",
f"{self.processing_time_estimate:.2f}", self.priority, "-", "-", f"{self.material_cost:.2f}",
f"{self.other_cost:.2f}")

    @staticmethod
    def from_dict(data): return InboundTruck(data['id'], data['arrival_time'],
data['processing_time_estimate'], data.get('priority', 5), data.get('material_cost', 0.0),
data.get('other_cost', 0.0))

class OutboundTruck(Truck):
    def __init__(self, truck_id, arrival_time, processing_time_estimate, dependencies,
required_departure_time=float('inf'), priority=5, material_cost=0.0, other_cost=0.0):
        super().__init__(truck_id, arrival_time, processing_time_estimate, priority, material_cost,
other_cost); self.dependencies = set(dependencies) if dependencies else set()

        try: rdt=float(required_departure_time)
        except (ValueError, TypeError): rdt=float('inf')

        self.required_departure_time = rdt; self.is_loaded = False; self.dependencies_met_time = None

    def __repr__(self): dep_str=",".join(sorted(list(self.dependencies))); dl_str="inf" if
self.required_departure_time==float('inf') else f"{self.required_departure_time:.2f}"; return
f"Out(ID:{self.id}, Arr:{self.arrival_time:.2f}, Proc:{self.processing_time_estimate:.2f}, Prio:{self.priority},
Dep:[{dep_str}], DL:{dl_str})"

    def get_details_tuple(self): dep_str=",".join(sorted(list(self.dependencies))); dl_str="inf" if
self.required_departure_time==float('inf') else f"{self.required_departure_time:.2f}"; return (self.id,
"Вихідний", f"{self.arrival_time:.2f}", f"{self.processing_time_estimate:.2f}", self.priority, dep_str, dl_str,
f"{self.material_cost:.2f}", f"{self.other_cost:.2f}")

    def to_dict(self): data=super().to_dict(); data['dependencies']=sorted(list(self.dependencies));
data['required_departure_time']='inf' if self.required_departure_time==float('inf') else
self.required_departure_time; return data

    @staticmethod
    def from_dict(data):
        dep_time=data.get('required_departure_time','inf')
        dtf = float('inf') if isinstance(dep_time,str) and dep_time.lower()=='inf' else float(dep_time) if

```

```

isinstance(dep_time, (int, float)) else float('inf')

    return

OutboundTruck(data['id'],data['arrival_time'],data['processing_time_estimate'],data.get('dependencies',
[]),dtf,data.get('priority',5),data.get('material_cost',0.0),data.get('other_cost',0.0))

```

```

class Dock:

```

```

    def __init__(self, dock_id): self.id=dock_id; self.is_free=True; self.free_at_time=0.0;
self.current_truck=None; self.total_busy_hours=0.0

    def assign_truck(self, truck, start_time, finish_time):
        if not self.is_free or start_time < self.free_at_time - 1e-9: return False
        self.is_free=False; self.current_truck=truck; self.free_at_time=finish_time;
truck.assigned_dock=self.id; truck.start_service_time=start_time; truck.finish_service_time=finish_time;
self.total_busy_hours+=max(0.0, finish_time - start_time); return True

    def release(self):
        if not self.current_truck: return "N/A"
        if isinstance(self.current_truck,InboundTruck): self.current_truck.is_unloaded=True
        elif isinstance(self.current_truck,OutboundTruck): self.current_truck.is_loaded=True
        rid=self.current_truck.id; self.is_free=True; self.current_truck=None; return rid

    def __repr__(self): return f"Dock({self.id}, {'Free' if self.is_free else f'Busy until {self.free_at_time:.2f}'}"

```

```

class CostParameters:

```

```

    def __init__(self, inbound_wait_rate=0.0, outbound_wait_rate=0.0, worker_rate=0.0,
equipment_rate=0.0, dock_rate=0.0, late_penalty=0.0):
        self.inbound_wait_rate=float(inbound_wait_rate);
self.outbound_wait_rate=float(outbound_wait_rate); self.worker_rate=float(worker_rate);
self.equipment_rate=float(equipment_rate); self.dock_rate=float(dock_rate);
self.late_penalty=float(late_penalty)

    def to_dict(self): return self.__dict__

    @classmethod
    def from_dict(cls, data): return cls(**{k:data.get(k,0.0) for k in cls.__init__.__code__.co_varnames if
k!='self'})

```

```

class ResourceInfo:

```

```

    def __init__(self, num_docks=0, total_workers=0, total_equipment=0, workers_per_dock=0,
equip_per_dock=0):

```

```

        self.num_docks=int(num_docks); self.total_workers=int(total_workers);
self.total_equipment=int(total_equipment); self.workers_per_dock=int(workers_per_dock);
self.equip_per_dock=int(equip_per_dock)
    def to_dict(self): return self.__dict__
    @classmethod
    def from_dict(cls, data): return cls(**{k:data.get(k,0) for k in cls.__init__.__code__.co_varnames if
k!='self'})

# --- Імітаційний Рушій ---
class CrossDockSimulator: # (Без змін відносно v4.2.2)
    def __init__(self, resource_info, cost_params, inbound_trucks, outbound_trucks):
        if not isinstance(resource_info, ResourceInfo): raise TypeError("resource_info must be ResourceInfo
object")
        if not isinstance(cost_params, CostParameters): raise TypeError("cost_params must be
CostParameters object")
        self.resource_info = resource_info; self.cost_params = cost_params
        self.inbound_trucks_orig = list(inbound_trucks); self.outbound_trucks_orig = list(outbound_trucks)
        self.docks = [Dock(i) for i in range(resource_info.num_docks)]
        self._reset_state()

    def _reset_state(self):
        self.current_time=0.0; self.available_workers=self.resource_info.total_workers;
self.available_equipment=self.resource_info.total_equipment; self.peak_workers_used=0;
self.peak_equipment_used=0; self.event_queue=[]; self.event_counter=0; self.waiting_inbound=[];
self.waiting_outbound=[]; self.pending_outbound=[]; self.completed_inbound={};
self.completed_outbound={}; self.schedule_log=[]
        for dock in self.docks: dock.is_free=True; dock.free_at_time=0.0; dock.current_truck=None;
dock.total_busy_hours=0.0
        self.inbound_trucks=[InboundTruck(t.id, t.arrival_time, t.processing_time_estimate, t.priority,
t.material_cost, t.other_cost) for t in self.inbound_trucks_orig]
        self.outbound_trucks=[OutboundTruck(t.id, t.arrival_time, t.processing_time_estimate,
list(t.dependencies), t.required_departure_time, t.priority, t.material_cost, t.other_cost) for t in
self.outbound_trucks_orig]
        self.inbound_trucks.sort(key=lambda t:t.arrival_time); self.outbound_trucks.sort(key=lambda
t:t.arrival_time)
        self.total_inbound_wait_cost=0.0; self.total_outbound_wait_cost=0.0; self.total_labor_cost=0.0;

```

```

self.total_equipment_cost=0.0; self.total_dock_cost=0.0; self.total_late_penalties=0.0;
self.total_material_cost=0.0; self.total_other_cost = 0.0

def _log(self, message): self.schedule_log.append(f"{self.current_time:.2f}: {message}")
def _push_event(self, event_time, event_type, data):
heapq.heappush(self.event_queue,(event_time,self.event_counter,event_type,data));
self.event_counter+=1

def run_simulation(self):
    self._reset_state(); self._log("Simulation starting...")
    for truck in self.inbound_trucks: self._push_event(truck.arrival_time, "INBOUND_ARRIVAL", truck)
    for truck in self.outbound_trucks: self._push_event(truck.arrival_time, "OUTBOUND_ARRIVAL",
truck)
    processed_events=0; max_loop=(len(self.inbound_trucks)+len(self.outbound_trucks))*10+1000
    while self.event_queue or any(not d.is_free for d in self.docks):
        processed_events+=1;
        if processed_events>max_loop: self._log("Error: Sim stopped, event limit."); break
        if not self.event_queue:
            next_release=min((d.free_at_time for d in self.docks if not d.is_free), default=float('inf'))
            if next_release==float('inf'): break
            if next_release > self.current_time+1e-9: self.current_time = next_release
            processed_docks=set()
            for dock in self.docks:
                if not dock.is_free and abs(dock.free_at_time-self.current_time)<1e-9 and dock.id not in
processed_docks:
                    if not any(evt[2]=="SERVICE_COMPLETED" and evt[3][0]==dock.id for evt in
self.event_queue): self._push_event(self.current_time,"SERVICE_COMPLETED",(dock.id,
dock.current_truck)); processed_docks.add(dock.id)
                    if not self.event_queue: continue
                    event_time, _, event_type, data = heapq.heappop(self.event_queue)
                    if event_time > self.current_time: self.current_time = event_time
                    if event_type == "INBOUND_ARRIVAL": truck=data; self._log(f"In {truck.id} arrived.");
self.waiting_inbound.append(truck); self.waiting_inbound.sort(key=lambda t:(t.priority,t.arrival_time));
self.try_assign_tasks()
                    elif event_type == "OUTBOUND_ARRIVAL": truck=data; self._log(f"Out {truck.id} ready.");
self.pending_outbound.append(truck); self.pending_outbound.sort(key=lambda

```

```

t:(t.priority,t.arrival_time)); self.check_pending_outbound()
    elif event_type == "SERVICE_COMPLETED":
        dock_id, truck = data
        if dock_id >= len(self.docks) or self.docks[dock_id].current_truck != truck: continue
        duration = max(0.0, truck.finish_service_time - truck.start_service_time if
truck.start_service_time else 0.0)
        rid = self.docks[dock_id].release(); w_used = self.resource_info.workers_per_dock;
e_used = self.resource_info.equip_per_dock
        self.available_workers += w_used; self.available_equipment += e_used
        self.total_labor_cost += duration * w_used * self.cost_params.worker_rate;
self.total_equipment_cost += duration * e_used * self.cost_params.equipment_rate;
self.total_material_cost += truck.material_cost; self.total_other_cost += truck.other_cost
        if isinstance(truck, OutboundTruck) and truck.finish_service_time >
truck.required_departure_time + 1e-9: self.total_late_penalties += self.cost_params.late_penalty;
self._log(f"Out {truck.id} completed LATE at D{dock_id}.")
        else: self._log(f"Truck {rid} completed at D{dock_id}. Avail W/E:
{self.available_workers}/{self.available_equipment}")
        if isinstance(truck, InboundTruck): self.completed_inbound[truck.id] = truck;
self.check_pending_outbound()
        elif isinstance(truck, OutboundTruck): self.completed_outbound[truck.id] = truck
        self.try_assign_tasks()
        if self.waiting_inbound or self.waiting_outbound or self.pending_outbound or any(not d.is_free for d
in self.docks): self._log("Warning: Sim ended w/ waiting trucks or busy docks.")
        else: self._log(f"Sim finished normally at {self.current_time:.2f}")
        return self.calculate_results()

def check_dependencies(self, ot): return all(dep_id in self.completed_inbound for dep_id in
ot.dependencies)

def check_pending_outbound(self):
    still_pending = []; moved = False
    for truck in self.pending_outbound:
        if self.check_dependencies(truck):
            if truck.dependencies_met_time is None: truck.dependencies_met_time = self.current_time;
truck.start_queue_time = self.current_time; self._log(f"Deps met for Out {truck.id}.")
            self.waiting_outbound.append(truck); moved = True
        else: still_pending.append(truck)

```

Додаток Д

ЛІСТИНГ ПРОГРАМИ ІМІТАЦІЇ (ФРАГМЕНТ)

```

import tkinter as tk
from tkinter import ttk, messagebox, filedialog
import pandas as pd
from collections import defaultdict, deque
import datetime
import matplotlib.pyplot as plt
import matplotlib.dates as mdates
import matplotlib.colors as mcolors
import os
import itertools
import sys
import subprocess
import heapq
import math

plt.rcParams['font.family'] = 'DejaVu Sans'

class CrossDockingOptimizerApp:
    def __init__(self, master):
        self.master = master
        master.title("Оптимізація розкладів крос-докінгу ")
        master.geometry("1300x900")

        style = ttk.Style()
        style.theme_use('clam')
        style.configure("TLabel", padding=5, font=('Arial', 10))
        style.configure("TButton", padding=5, font=('Arial', 10))
        style.configure("TEntry", padding=5, font=('Arial', 10))
        style.configure("Treeview.Heading", font=('Arial', 10, 'bold'))
        style.configure("Treeview", font=('Arial', 10), rowheight=25)
        style.configure("TNotebook.Tab", padding=[10, 5], font=('Arial', 10, 'bold'))

        main_frame = ttk.Frame(master, padding="5")

```

```

main_frame.pack(fill=tk.BOTH, expand=True)
main_frame.columnconfigure(0, weight=2, minsize=520)
main_frame.columnconfigure(1, weight=3)
main_frame.rowconfigure(0, weight=1)

input_controls_frame = ttk.Frame(main_frame)
input_controls_frame.grid(row=0, column=0, sticky="nsew", padx=5, pady=5)
output_display_frame = ttk.Frame(main_frame)
output_display_frame.grid(row=0, column=1, sticky="nsew", padx=5, pady=5)

input_controls_frame.rowconfigure(0, weight=0)
input_controls_frame.rowconfigure(1, weight=1)
input_controls_frame.rowconfigure(2, weight=0)
input_controls_frame.columnconfigure(0, weight=1)

input_frame = ttk.LabelFrame(input_controls_frame, text="Вхідні дані", padding="10")
input_frame.grid(row=0, column=0, sticky="new", pady=(0, 10))
route_frame = ttk.LabelFrame(input_controls_frame, text="Дані по маршрутах доставників",
padding="10")
route_frame.grid(row=1, column=0, sticky="nsew")
button_panel = ttk.Frame(input_controls_frame, padding="5")
button_panel.grid(row=2, column=0, sticky="sew", pady=(10, 0))

self.num_delivery_vehicles_var = tk.IntVar(value=3)
self.num_bays_var = tk.IntVar(value=2)
self.start_time_var = tk.StringVar(value="08:00")
self.planning_horizon_var = tk.IntVar(value=480)
self.mainline_load_time_var = tk.IntVar(value=60)
self.cost_dv_idle_var = tk.DoubleVar(value=1.5)
self.cost_mv_idle_var = tk.DoubleVar(value=3.0)
self.cost_bay_idle_var = tk.DoubleVar(value=0.5)
self.num_routes_var = tk.IntVar(value=2)

row_idx = 0
fields = [
    ("Кількість авто-доставників:", self.num_delivery_vehicles_var),

```

```

("Кількість НРП (постів):", self.num_bays_var),
("Початок роботи (ГГ:ХХ):", self.start_time_var),
("Горизонт план., хв:", self.planning_horizon_var),
("Час завант. магістрал. партії (20т), хв:", self.mainline_load_time_var),
("Вартість простою доставника (грн/хв):", self.cost_dv_idle_var),
("Вартість простою магістрал. вантажу (грн/хв):", self.cost_mv_idle_var),
("Вартість простою НРП (грн/хв):", self.cost_bay_idle_var),
("К-ть маршрутів доставників:", self.num_routes_var)
]
for text, var in fields:
    ttk.Label(input_frame, text=text).grid(row=row_idx, column=0, sticky="w", pady=2)
    entry = ttk.Entry(input_frame, textvariable=var, width=10)
    entry.grid(row=row_idx, column=1, sticky="ew", padx=5, pady=2)
    if text == "К-ть маршрутів доставників:":
        self.num_routes_entry = entry
        entry.bind("<FocusOut>", self.update_route_table)
        entry.bind("<Return>", self.update_route_table)
    row_idx += 1
input_frame.columnconfigure(1, weight=1)
self.mainline_capacity = 20.0

self.route_table_frame = ttk.Frame(route_frame)
self.route_table_frame.pack(fill="both", expand=True)
self.canvas = tk.Canvas(self.route_table_frame)
self.scrollbar = ttk.Scrollbar(self.route_table_frame, orient="vertical", command=self.canvas.yview)
self.scrollable_frame_routes = ttk.Frame(self.canvas)
self.scrollable_frame_routes.bind("<Configure>",
                                lambda e: self.canvas.configure(scrollregion=self.canvas.bbox("all")))
self.canvas_window = self.canvas.create_window((0, 0), window=self.scrollable_frame_routes,
anchor="nw")
self.canvas.configure(yscrollcommand=self.scrollbar.set)
self.canvas.pack(side="left", fill="both", expand=True);
self.scrollbar.pack(side="right", fill="y")
self.canvas.bind("<Configure>", self.on_canvas_configure)
self.route_entries = []
self.create_route_table()

```

```

self.calc_button = ttk.Button(button_panel, text="Розрахувати та Оптимізувати",
                               command=self.calculate_and_display)
self.calc_button.pack(pady=5, fill='x')
self.new_calc_button = ttk.Button(button_panel, text="Новий розрахунок",
command=self.clear_all)
self.new_calc_button.pack(pady=5, fill='x')
self.export_excel_button = ttk.Button(button_panel, text="Експорт розкладів в Excel",
                                       command=self.export_schedules_to_excel, state=tk.DISABLED)
self.export_excel_button.pack(pady=5, fill='x')
self.save_gantt_button = ttk.Button(button_panel, text="Зберегти діаграму Ганта",
command=self.save_gantt_chart,
                                       state=tk.DISABLED)
self.save_gantt_button.pack(pady=5, fill='x')

self.notebook = ttk.Notebook(output_display_frame)
self.notebook.pack(fill=tk.BOTH, expand=True, pady=5)
self.schedule_texts = {}
tab_names = ["Розклад Доставників", "Розклад Магістральних Відправлень", "Розклад НРП",
"Діаграма Ганта",
            "Показники ефективності"]
for name in tab_names:
    tab = ttk.Frame(self.notebook, padding="5")
    self.notebook.add(tab, text=name)
    if name == "Діаграма Ганта":
        self.gantt_display_label = ttk.Label(tab, text="Діаграма Ганта буде згенерована після
розрахунку.")
        self.gantt_display_label.pack(anchor="w", pady=5)
        self.gantt_display_label.bind("<Button-1>", self.open_gantt_file)
    else:
        text_widget = tk.Text(tab, wrap="none", height=10, font=("Courier New", 9))
        scroll_y = ttk.Scrollbar(tab, orient="vertical", command=text_widget.yview)
        scroll_x = ttk.Scrollbar(tab, orient="horizontal", command=text_widget.xview)
        text_widget['yscrollcommand'] = scroll_y.set;
        text_widget['xscrollcommand'] = scroll_x.set
        scroll_y.pack(side=tk.RIGHT, fill=tk.Y);

```

```

scroll_x.pack(side=tk.BOTTOM, fill=tk.X)
text_widget.pack(fill=tk.BOTH, expand=True)
self.schedule_texts[name] = text_widget

self.schedule_log = None;
self.last_gantt_path = None;
self.event_counter = itertools.count();
self.base_datetime_for_schedules = None

def create_route_table(self):
    for widget in self.scrollable_frame_routes.winfo_children(): widget.destroy()
    self.route_entries = []
    try:
        num_routes = self.num_routes_var.get();
        if num_routes < 1: num_routes = 1
    except tk.TclError:
        num_routes = 1
    self.num_routes_var.set(num_routes)
    headers = ["№ Маршруту", "Час оберту, хв", "Сер. вантаж, т", "К-ть їздок", "ID Магістрала (0-зарал)"]
    column_widths = [10, 15, 15, 10, 20]
    for col, header in enumerate(headers):
        lbl = ttk.Label(self.scrollable_frame_routes, text=header, font=('Arial', 9, 'bold'), relief=tk.RIDGE,
            padding=3, anchor='center')
        lbl.grid(row=0, column=col, sticky="nsew");
        self.scrollable_frame_routes.columnconfigure(col, weight=1, minsize=column_widths[col] * 5)
    for i in range(num_routes):
        ttk.Label(self.scrollable_frame_routes, text=f"{i + 1}", relief=tk.RIDGE, padding=3,
            anchor="center").grid(
            row=i + 1, column=0, sticky="nsew")
        default_turnaround = [60, 80, 45, 90, 110]
        default_weight = [2.5, 3.0, 4.0, 1.5, 1.0]
        default_trips = [2, 1, 3, 2, 4]
        default_mainline = [0, 1, 0, 1, 0]
        tv = tk.IntVar(value=default_turnaround[i] if i < len(default_turnaround) else 60)
        weight_var = tk.DoubleVar(value=default_weight[i] if i < len(default_weight) else 2.0)

```

```

trv = tk.IntVar(value=default_trips[i] if i < len(default_trips) else 2)
mv_assign_var = tk.IntVar(value=default_mainline[i] if i < len(default_mainline) else 0)
ttk.Entry(self.scrollable_frame_routes, textvariable=trv, width=column_widths[1],
justify='center').grid(
    row=i + 1, column=1, sticky="nsew")
ttk.Entry(self.scrollable_frame_routes, textvariable=weight_var, width=column_widths[2],
justify='center').grid(row=i + 1, column=2, sticky="nsew")
ttk.Entry(self.scrollable_frame_routes, textvariable=trv, width=column_widths[3],
justify='center').grid(
    row=i + 1, column=3, sticky="nsew")
ttk.Entry(self.scrollable_frame_routes, textvariable=mv_assign_var, width=column_widths[4],
justify='center').grid(row=i + 1, column=4, sticky="nsew")
self.route_entries.append(
    {'id': i + 1, 'turnaround_var': tv, 'cargo_weight_var': weight_var, 'trips_var': trv,
    'mainline_assignment_var': mv_assign_var})

def update_route_table(self, event=None):
    self.create_route_table()

def get_input_data(self):
    try:
        data = {}
        data['num_delivery_vehicles'] = self.num_delivery_vehicles_var.get()
        data['num_bays'] = self.num_bays_var.get()
        data['planning_horizon'] = self.planning_horizon_var.get()
        data['mainline_load_time'] = self.mainline_load_time_var.get()
        data['mainline_capacity'] = self.mainline_capacity
        data['cost_dv_idle_rate'] = self.cost_dv_idle_var.get()
        data['cost_mv_idle_rate'] = self.cost_mv_idle_var.get()
        data['cost_bay_idle_rate'] = self.cost_bay_idle_var.get()
        start_time_str = self.start_time_var.get()
        h, m = map(int, start_time_str.split(':'))
        if not (0 <= h <= 23 and 0 <= m <= 59): raise ValueError("Некоректний формат часу")
        data['start_hour'] = h;
        data['start_minute'] = m
        if not (data['num_delivery_vehicles'] > 0 and data['num_bays'] > 0 and data['planning_horizon'] >

```

0 and \

```

        data['mainline_load_time'] >= 0 and data['cost_dv_idle_rate'] >= 0 and \
        data['cost_mv_idle_rate'] >= 0 and data['cost_bay_idle_rate'] >= 0):
            raise ValueError("Числові параметри мають бути >= 0 (к-ть авто-доставників та НРП > 0).")
    data['routes'] = []
    for entry in self.route_entries:
        cargo_weight = entry['cargo_weight_var'].get()
        if cargo_weight <= 0: raise ValueError(f"Вага вантажу для Маршруту {entry['id']} має бути >
0.")

        unload_time = self.calculate_delivery_unload_time(cargo_weight)
        rd = {'id': entry['id'], 'turnaround_time': entry['turnaround_var'].get(), 'cargo_weight':
cargo_weight,
            'load_unload_time': unload_time, 'num_trips': entry['trips_var'].get(),
            'mainline_assignment': entry['mainline_assignment_var'].get()}
        if not (rd['turnaround_time'] > 0 and rd['load_unload_time'] >= 0 and \
            rd['num_trips'] > 0 and rd['turnaround_time'] >= rd['load_unload_time'] and rd[
            'mainline_assignment'] >= 0):
            raise ValueError(f"Некоректні дані для Маршруту {rd['id']}.")
        data['routes'].append(rd)
        if not data['routes']: raise ValueError("Не введено дані для жодного маршруту.")
    return data

except (tk.TclError, ValueError) as e:
    messagebox.showerror("Помилка вводу", f"Будь ласка, перевірте введені дані.\n{e}"); return
None

except Exception as e:
    messagebox.showerror("Помилка", f"Сталася невідома помилка: {e}"); return None

```

```
def event_based_scheduler_optimized(self, data):
```

```
    # --- Повна реалізація планувальника ---
```

```
    num_dv = data['num_delivery_vehicles'];
```

```
    num_bays = data['num_bays']
```

```
    routes_input = data['routes'];
```

```
    start_offset = data['start_hour'] * 60 + data['start_minute']
```

```
    horizon = data['planning_horizon'];
```

```
    mainline_load_time_per_batch = data['mainline_load_time']
```

```
    mainline_target_capacity = data['mainline_capacity']
```

```

cost_dv_idle_rate = data['cost_dv_idle_rate']
cost_mv_cargo_idle_rate = data['cost_mv_idle_rate']
cost_bay_idle_rate = data['cost_bay_idle_rate']

dv_available_at = [start_offset] * num_dv
bay_available_at = [start_offset] * num_bays

dv_total_idle_time = [0.0] * num_dv
bay_total_idle_time = [0.0] * num_bays

event_queue = []
self.event_counter = itertools.count()
gant_log = []

# Словник для відстеження наступної поїздки для кожного маршруту
route_next_trip = {r['id']: 1 for r in routes_input}
delivery_tasks_by_route_trip = {} # Для зберігання даних про конкретні поїздки

# Генерація початкових подій прибуття перших поїздок
for r_info in routes_input:
    if route_next_trip[r_info['id']] <= r_info['num_trips']:
        arrival_time = start_offset + r_info['turnaround_time'] # Час прибуття першого рейсу
        task_details = {**r_info, 'trip_num': 1, 'status': 'pending_arrival', 'arrival_lc_time': arrival_time}
        delivery_tasks_by_route_trip[(r_info['id'], 1)] = task_details # Зберігаємо дані про поїздки
        heapq.heappush(event_queue, (arrival_time, next(self.event_counter), 'delivery_arrival',
task_details))

# Інформація про магістральні відправлення
mainline_dispatches = defaultdict(lambda: {
    'id_display': None, 'status': 'accumulating',
    'accumulated_weight': 0.0, 'batches_formed': 0,
    'current_batch_ready_time': float('inf'),
    'required_deliveries_total': 0,
    'completed_deliveries_count': 0,
    'is_loading_scheduled_for_current_batch': False,
    'idle_time_waiting_for_bay': 0.0

```

```

}))
unique_mv_assignments = sorted(list(set(r['mainline_assignment'] for r in routes_input)))
for mv_assign_id in unique_mv_assignments:
    dispatch_id_str = f"Mar.{mv_assign_id}" if mv_assign_id != 0 else "Mar.Загальний"
    mainline_dispatches[mv_assign_id]['id_display'] = dispatch_id_str
    mainline_dispatches[mv_assign_id]['required_deliveries_total'] = sum(
        r['num_trips'] for r in routes_input if r['mainline_assignment'] == mv_assign_id
    )

current_time = start_offset

# --- Основний цикл симуляції ---
while event_queue:
    event_time, _, event_type, event_data = heapq.heappop(event_queue)

    if event_time > start_offset + horizon: break

    idle_this_step = event_time - current_time
    if idle_this_step > 0.001:
        for i in range(num_dv):
            if dv_available_at[i] <= current_time: dv_total_idle_time[i] += idle_this_step
        for i in range(num_bays):
            if bay_available_at[i] <= current_time: bay_total_idle_time[i] += idle_this_step
        for md_id, md_info in mainline_dispatches.items():
            if md_info.get('status') == 'cargo_ready' and md_info.get('current_batch_ready_time',
                float('inf')) <= current_time and not md_info.get(
                    'is_loading_scheduled_for_current_batch'):
                md_info['idle_time_waiting_for_bay'] += idle_this_step

    current_time = event_time

    if event_type == 'delivery_arrival':
        task_data = event_data
        if task_data.get('status') != 'pending_arrival': continue

    best_dv_idx = min(range(num_dv), key=lambda i: dv_available_at[i], default=-1)

```

```

best_bay_idx = min(range(num_bays), key=lambda i: bay_available_at[i], default=-1)

if best_dv_idx != -1 and best_bay_idx != -1:
    op_start_time = max(current_time, dv_available_at[best_dv_idx],
bay_available_at[best_bay_idx])
    op_duration = task_data['load_unload_time']
    op_end_time = op_start_time + op_duration

    if op_end_time <= start_offset + horizon:
        if op_start_time > dv_available_at[best_dv_idx]: dv_total_idle_time[best_dv_idx] += (
            op_start_time - dv_available_at[best_dv_idx])
        if op_start_time > bay_available_at[best_bay_idx]: bay_total_idle_time[best_bay_idx] += (
            op_start_time - bay_available_at[best_bay_idx])

        dv_available_at[best_dv_idx] = op_end_time
        bay_available_at[best_bay_idx] = op_end_time
        task_data['status'] = 'unloading'

        task_label = f"Позв.Д{best_dv_idx + 1}(M{task_data['id']}-П{task_data['trip_num']})"
        gantt_log.append(
            ('НП', best_bay_idx + 1, task_label, datetime.timedelta(minutes=op_start_time),
            datetime.timedelta(minutes=op_end_time), 'blue'))
        gantt_log.append(('Доставник', best_dv_idx + 1, f"Позв. на НП{best_bay_idx + 1}",
            datetime.timedelta(minutes=op_start_time),
            datetime.timedelta(minutes=op_end_time), 'lightblue'))

        heapq.heappush(event_queue, (op_end_time, next(self.event_counter),
'unload_complete',
                                {'dv_idx': best_dv_idx, 'bay_idx': best_bay_idx, **task_data}))
    else:
        heapq.heappush(event_queue, (current_time + 1, next(self.event_counter),
'delivery_arrival',
                                task_data)) # Reschedule
else:
    next_check_time = current_time + 1
    if best_dv_idx == -1 and num_dv > 0: next_check_time = max(next_check_time,

```

```

min(dv_available_at))
    if best_bay_idx == -1 and num_bays > 0: next_check_time = max(next_check_time,
                                                                    min(bay_available_at))
    heapq.heappush(event_queue, (next_check_time, next(self.event_counter),
'delivery_arrival',
                                task_data)) # Reschedule

elif event_type == 'unload_complete':
    dv_idx = event_data['dv_idx'];
    bay_idx = event_data['bay_idx']
    route_id = event_data['id'];
    trip_num = event_data['trip_num']
    turnaround = event_data['turnaround_time'];
    load_unload = event_data['load_unload_time']
    cargo_w = event_data['cargo_weight'];
    mainline_assign_id = event_data['mainline_assignment']

    dv_return_ready_time = current_time + (turnaround - load_unload)

```