

Міністерство освіти і науки України  
Харківський національний автомобільно-дорожній університет

Кваліфікаційна  
наукова  
праця на правах  
рукопису

Сальніков Єгор Костянтинович

УДК 656.073

## ДИСЕРТАЦІЯ

### ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ОРГАНІЗАЦІЇ ТА ЛОГІСТИЧНОГО УПРАВЛІННЯ ПРОЦЕСОМ ДОСТАВКИ ВАНТАЖІВ У МІСЬКИХ УМОВАХ

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



Є.К. Сальніков

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

Харків – 2026

## АНОТАЦІЯ

*Сальніков Є.К.* Підвищення ефективності організації та логістичного управління процесом доставки вантажів у міських умовах. – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора філософії за спеціальністю 275 «Транспортні технології (за видами)». – Харківський національний автомобільно-дорожній університет, МОН України, Харків, 2026.

У сучасних умовах функціонування транспортних систем міст питання ефективності логістики набувають критичного значення, особливо в умовах екстремальної невизначеності та інтенсивних зовнішніх воєнних впливів. Традиційні методи оптимізації, орієнтовані виключно на мінімізацію витрат, виявляються неспроможними забезпечити стабільність постачання під час повітряних тривог, руйнування інфраструктури та блокування транспортних артерій. Необхідність переходу від детермінованих моделей до робастного планування, що інтегрує чинники безпеки безпосередньо в логістичні алгоритми, визначає актуальність та своєчасність даного дослідження.

У роботі проведено комплексне дослідження процесів міської логістики в умовах конфлікту. Здійснено глибокий аналіз функціонування транспортних систем у кризових ситуаціях та ідентифіковано критичні точки дестабілізації логістичних ланцюгів. Формалізовано поняття «воєнного ризику» як інтегрального показника, що поєднує ймовірність фізичного блокування ділянок мережі та прогнозовані часові втрати під час повітряних тривог.

Розроблено науково-методичний апарат побудови «безпекового каркаса» транспортної мережі на основі методу ядерного згладжування щільності (KDE). Це дозволило трансформувати дискретну статистику воєнних інцидентів у неперервне імовірнісне поле небезпеки, яке використовується для динамічного коригування ваги дуг транспортного графа. Запропоновано модифіковану математичну модель робастної маршрутизації,

де логістичні витрати розраховуються з урахуванням превентивної «безпекової надбавки».

Здійснено програмну реалізацію симуляційно-евристичного алгоритму мовою Python із використанням об'єктно-орієнтованого підходу. Розроблений інструментарій поєднує швидкий пошук оптимальних траєкторій із блоком ітераційної верифікації рішень методом Монте-Карло. Це забезпечує можливість багаторазової перевірки сформованих планів на стійкість до раптових зупинок руху. На прикладі реальної транспортної мережі м. Харків проведено серію імітаційних експериментів, що дозволило автоматизувати процес прийняття рішень та забезпечити високу адаптивність транспортно-технологічних схем до динамічних змін безпекової ситуації.

Наукова новизна дисертаційної роботи полягає у розвитку комплексного науково-методичного підходу до підвищення ефективності міської логістики шляхом формалізації та інтеграції чинників воєнної небезпеки в робастні процедури планування доставки вантажів. *Вперше* розроблено метод формування ризик-орієнтованої вартості проходження ділянок міської транспортної мережі, який, на відміну від існуючих методів маршрутизації, додатково оцінює просторово-часову інтенсивність воєнних загроз, імовірність блокування ділянок маршруту та очікувані втрати від вимушених простоїв, що дозволяє обирати маршрут за інтегральним критерієм логістичних витрат з урахуванням безпекової складової.

*Набув подальшого розвитку* методичний підхід до оцінювання ефективності та робастності маршрутних рішень у міській логістичній мережі, який, на відміну від існуючих поєднує геопросторове моделювання зон ризику, графову модель транспортної мережі та сценарну імітаційну перевірку маршрутів за умов збоїв, що дозволяє порівнювати альтернативні маршрути за витратами, часовими втратами, ризиковою експозицією та ймовірністю успішного виконання доставки.

*Удосконалено* математичну модель маршрутизації вантажних автомобільних перевезень у міських умовах, яка, на відміну від відомих

моделей маршрутизації, доповнена безпековою компонентою цільової функції, що забезпечує переоцінку ваг дуг транспортного графа залежно від рівня воєнного ризику та дає змогу формувати робастні маршрути, що мінімізують вартісну експозицію ризику за умов просторово-часової невизначеності.

*Практичне значення одержаних результатів* виявляється у створенні дієвого програмного інструментарію для логістичних компаній, що дозволяє в автоматичному режимі коригувати плани доставки з урахуванням тривалості повітряних тривог та ризиків пошкодження інфраструктури. Розроблена методика кількісного оцінювання воєнної складової витрат забезпечує підприємствам можливість точного ціноутворення та превентивного розрахунку ресурсів, необхідних для покриття збитків від вимушених простоїв. Впровадження системи геопросторової візуалізації ризиків надає керівникам транспортних підрозділів можливість приймати обґрунтовані рішення щодо допуску автомобілів до рейсів у конкретних районах міста.

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: вантаж, перевезення, модель, ефективність, логістика, транспорт, оптимізація, витрати, система, доставка, мережа, ланцюг, процес, управління, робастність.

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) 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>

3) Калініченко О. П., Сальніков Є. К. Математичне моделювання задачі маршрутизації вантажних перевезень в умовах військових ризиків. *Комунальне господарство міст. Серія: «Інформаційні технології та інженерія»*. 2025. Том 6, № 194. С. 420–425. URL: <https://doi.org/10.33042/3083-6727-2025-6-194-420-425>

4) Калініченко О. П., Сальніков Є. К. Оптимізація міської логістики в умовах невизначеності та ризиків. *Комунальне господарство міст. Серія: «Інформаційні технології та інженерія»*. 2026. Том 1, вип. 196. С. 358–364. URL: <https://doi.org/10.33042/3083-6727-2026-1-196-358-364>

5) Kalinichenko O., Sevidova V., Salnikov Y., Kopytkov D. Determining the Expedient Scheme for Delivering Goods by Road Transport in International Traffic. *Transport Systems Development – Methods and Solutions. TSTP 2025* / eds. G. Sierpiński, S. Naumann, E. Macioszek. Cham : Springer, 2026. (Lecture Notes in Networks and Systems ; vol. 1789). URL: [https://doi.org/10.1007/978-3-032-14826-1\\_8](https://doi.org/10.1007/978-3-032-14826-1_8)

Наукові праці, які засвідчують апробацію матеріалів дисертації:

1. Salnikov Ye. K., Kalinichenko O. P. Current state of digitalization of cargo transportation in city conditions. *Студентство. Наука. Іноземна мова : збірник наукових праць студентів, аспірантів та молодих науковців*. Харків : ХНАДУ, 2023. Вип. 15, ч. 2. С. 355–357.

2. Сальніков Є. К., Калініченко О. П. Впровадження концепції Smart City та інформаційних технологій в міську логістику. *Збірник тез доповідей 79-ої Наукової конференції професорсько-викладацького складу, аспірантів, студентів та співробітників відокремлених структурних підрозділів університету*. Київ : НТУ, 2023. Вип. 79.

3. Сальніков Є. К., Калініченко О. П. Концепції логістичного управління вантажними перевезеннями в транспортній системі міста. *Збірник матеріалів 87-ї міжнародної науково-технічної та науково-методичної*

конференції університету. Секція транспортних технологій (Харків, 10–13 травня 2023 р.). Харків : ХНАДУ, 2023. С. 18–20.

4. Сальніков Є. К., Калініченко О. П. Аналіз сучасних міських логістичних систем. *Напрями розвитку технологічної системи логістики в АПВ : збірник матеріалів IV Міжнародної науково-практичної інтернет-конференції (Харків, 20 квітня 2023 р.)*. Харків : ДБТУ, 2023. С. 69–72.

5. Сальніков Є. К., Калініченко О. П. Сучасні підходи до логістичного управління вантажними перевезеннями в міському сполученні. *Збірник матеріалів Міжнародної науково-технічної конференції «Розумний транспорт та інтегровані транспортні технології»*. Харків : ХНАДУ, 2023.

6. Sevidova V. V., Salnikov Ye. K., Kalinichenko O. P. The impact of digitalization on freight transportation. *Topical aspects of modern scientific research : Proceedings of the International Scientific and Practical Conference (March 21-23, 2024)*. Tokyo, Japan : CPN Publishing Group, 2024. P. 114–118.

7. Salnikov Ye. K., Kalinichenko O. P. The importance of digitalization in urban freight transportation. *Інтелектуальні транспортні технології (Харків, 25–27 листопада 2024 р.) : тези доповідей*. Харків : УкрДУЗТ, 2024. С. 177–178.

## ABSTRACT

Salnikov Ye. K. Improving the efficiency of organization and logistical management of the freight delivery process in urban conditions. – Qualifying scientific work on the rights of a manuscript.

Dissertation for the degree of doctor of philosophy in the specialty 275 «Transport Technologies (by mode)» – Kharkiv National Automobile and Highway University, Ministry of Education and Science of Ukraine, Kharkiv, 2026.

In the modern functioning of urban transport systems, logistical efficiency has become critically important, especially under conditions of extreme uncertainty and intensive external military impacts. Traditional optimization methods, focused

solely on cost minimization, prove incapable of ensuring supply stability during air raid alerts, infrastructure destruction, and the blocking of transport arteries. The necessity of transitioning from deterministic models to robust planning – which integrates safety factors directly into logistical algorithms – defines the relevance and timeliness of this study.

This work conducts a comprehensive study of urban logistics processes in conflict conditions. A deep analysis of transport system functioning in crisis situations was performed, and critical points of logistics chain destabilization were identified. The concept of «military risk» is formalized as an integral indicator combining the probability of physical blockage of network sections and predicted time losses during air raid alerts.

A scientific-methodological apparatus for constructing a «security framework» of the transport network based on the Kernel Density Estimation (KDE) method has been developed. This allowed for the transformation of discrete military incident statistics into a continuous probabilistic field of danger, used for the dynamic adjustment of weights of the transport graph arcs. A modified mathematical model for robust routing is proposed, where logistical costs are calculated taking into account a preventive «security premium».

The study includes the software implementation of a simulation-heuristic algorithm in Python using an object-oriented approach. The developed toolkit combines a rapid search for optimal trajectories with a block for iterative solution verification via the Monte Carlo method. This ensures the possibility of multiple checks of generated plans for resilience against sudden traffic halts. Using the real transport network of Kharkiv as an example, a series of simulation experiments were conducted, allowing for the automation of decision-making and ensuring high adaptability of transport-technological schemes to dynamic changes in the security situation.

The scientific novelty of the dissertation research lies in the further development of a comprehensive scientific and methodical approach to improving

the efficiency of urban logistics through the formalization and integration of military hazard factors into robust freight delivery planning procedures.

For the first time, a method has been developed for forming the risk-oriented cost of traversing links of an urban transport network, which, unlike existing routing methods, additionally evaluates the spatiotemporal intensity of military threats, the probability of route link blocking, and the expected losses from forced downtime, thereby allowing for the selection of a route based on an integral criterion of logistics costs with consideration of the security component.

The methodical approach to evaluating the efficiency and robustness of routing decisions in an urban logistics network has been further developed, which, unlike existing approaches, combines geospatial modeling of risk zones, a graph model of the transport network, and scenario-based simulation verification of routes under disruption conditions, enabling the comparison of alternative routes based on costs, time losses, risk exposure, and the probability of successful delivery execution.

The mathematical model of freight vehicle routing in urban areas has been improved, which, unlike known routing models, is supplemented with a security component of the objective function. This ensures the re-evaluation of transport graph edge weights depending on the level of military risk and enables the generation of robust routes that minimize the cost exposure of risk under spatiotemporal uncertainty.

The practical significance of the results is demonstrated in the creation of an effective software toolkit for logistics companies, allowing for the automated adjustment of delivery plans considering the duration of air raid alerts and infrastructure damage risks. The developed methodology for quantifying the military component of costs enables enterprises to perform accurate pricing and preventive calculation of resources needed to cover losses from forced downtime. The implementation of a geospatial risk visualization system provides transport managers with the ability to make informed decisions regarding vehicle dispatch to specific city districts.

The research results have been implemented into the operations of logistics enterprises, confirmed by implementation certificates, and used in the educational process at KhNAHU (Kharkiv National Automobile and Highway University) for teaching transport and logistics disciplines.

Keywords: cargo, transportation, model, efficiency, logistics, transport, optimization, costs, system, delivery, network, chain, process, management, robustness.

List of publications.

Scientific works publishing the main results of the dissertation:

1. Sevidova, V. V., Salnikov, Ye. K., & Kalinichenko, O. P. (2023). Application of digital technologies in international cargo delivery. *Municipal Economy of Cities*, Vol. 3, No. 177, pp. 200–205. <https://doi.org/10.33042/2522-1809-2023-3-177-200-205>
2. Kalinichenko, O. P., Cherepakha, O. S., Sevidova, V. V., & Salnikov, Ye. K. (2024). Improvement of the technological process of perishable goods delivery in Kharkiv. *Municipal Economy of Cities*, Vol. 4, No. 185, pp. 275–281. <https://doi.org/10.33042/2522-1809-2024-4-185-275-281>
3. Kalinichenko, O. P., & Salnikov, Ye. K. (2025). Mathematical modeling of the cargo transportation routing problem under military risks. *Municipal Economy of Cities. Series: Information Technologies and Engineering*, Vol. 6, No. 194, pp. 420–425. <https://doi.org/10.33042/3083-6727-2025-6-194-420-425>
4. Kalinichenko, O. P., & Salnikov, Ye. K. (2026). Optimization of urban logistics under uncertainty and risks. *Municipal Economy of Cities. Series: Information Technologies and Engineering*, Vol. 1, No. 196, pp. 358–364. <https://doi.org/10.33042/3083-6727-2026-1-196-358-364>
5. Kalinichenko, O., Sevidova, V., Salnikov, Y., & Kopytkov, D. (2026). Determining the Expedient Scheme for Delivering Goods by Road Transport in International Traffic. In: G. Sierpiński, S. Naumann, E. Macioszek (Eds.), *Transport Systems Development – Methods and Solutions. TSTP 2025*. Lecture Notes in

Networks and Systems, Vol. 1789. Springer, Cham. [https://doi.org/10.1007/978-3-032-14826-1\\_8](https://doi.org/10.1007/978-3-032-14826-1_8)

Scientific works certifying the approbation of the dissertation materials:

1. Salnikov, Ye. K., & Kalinichenko, O. P. (2023). Current state of digitalization of cargo transportation in city conditions. *Students. Science. Foreign Language: Collection of scientific works*, Iss. 15, Part 2, pp. 355–357. Kharkiv: KhNAHU.
2. Salnikov, Ye. K., & Kalinichenko, O. P. (2023). Implementation of the Smart City concept and information technologies in urban logistics. *Abstracts of the 79th Scientific Conference of Faculty, Postgraduates, and Students*. Kyiv: NTU.
3. Salnikov, Ye. K., & Kalinichenko, O. P. (2023). Concepts of logistical management of freight transportation in the urban transport system. *Proceedings of the 87th International Scientific-Technical Conference, Transport Technologies Section*. Kharkiv: KhNAHU, pp. 18–20.
4. Salnikov, Ye. K., & Kalinichenko, O. P. (2023). Analysis of modern urban logistics systems. *Directions for the development of the technological logistics system in the agro-industrial complex: IV International Scientific-Practical Internet Conference*. Kharkiv: GBTU, pp. 69–72.
5. Salnikov, Ye. K., & Kalinichenko, O. P. (2023). Modern approaches to logistical management of freight transportation in urban traffic. *Proceedings of the International Scientific-Technical Conference "Smart Transport and Integrated Transport Technologies"*. Kharkiv: KhNAHU.
6. Sevidova, V. V., Salnikov, Ye. K., & Kalinichenko, O. P. (2024). The impact of digitalization on freight transportation. *Topical aspects of modern scientific research: Proceedings of the International Scientific and Practical Conference*. Tokyo, Japan: CPN Publishing Group, pp. 114–118.
7. Salnikov, Ye. K., & Kalinichenko, O. P. (2024). The importance of digitalization in urban freight transportation. *Intelligent Transport Technologies: Conference Abstracts*. Kharkiv: UkrSURT, pp. 177–178.

## ЗМІСТ

Вступ.....	13
Розділ 1 Огляд сучасного стану теорії та практики організації вантажних перевезень в міському сполученні .....	19
1.1 Інтеграція логістики, цифрова трансформація та сталий розвиток міст... 19	19
1.2 Ключові концепції та стратегії управління міськими вантажними перевезеннями .....	28
1.3 Роль інформаційних систем та цифрових технологій в міській логістиці 39	39
1.4 Вплив воєнних ризиків на стійкість та функціонування міських логістичних систем .....	48
1.5 Висновок за розділом.....	51
Розділ 2 Теоретичні основи вибору методу організації міських автомобільних перевезень .....	54
2.1 Міська вантажна логістика як складна адаптивна система .....	54
2.2 Критерії ефективності та оцінка логістичних процесів в умовах воєнних ризиків .....	65
2.3 Розробка математичної моделі маршрутизації транспортних засобів з воєнними ризиками .....	69
2.4 Методологічні основи вирішення задачі маршрутизації в умовах перманентної нестабільності.....	85
2.5 Висновок за розділом.....	104
Розділ 3 Алгоритмічна та програмна реалізація моделі оптимізації маршрутів в умовах воєнних ризиків.....	106
3.1 Симуляційно-евристичний алгоритм для синтезу раціональної топології маршрутів.....	106
3.2 Програмна реалізація алгоритму вибору безпечних маршрутів .....	113
3.3 Опис функціоналу та сценаріїв роботи з програмним комплексом .....	122
3.4 Розрахунок та аналіз контрольного прикладу.....	127
3.5 Інтерпретація результатів дослідження .....	132
3.6 Висновки за розділом.....	134

Розділ 4 Експериментальні дослідження та валідація робастної моделі оптимізації маршрутів .....	137
4.1 Планування багатофакторного експерименту та проведення експериментальних досліджень.....	137
4.2 Дослідження впливу вхідних параметрів на показники ефективності та робастності перевезень.....	146
4.3 Розрахунок очікуваного соціально-економічного ефекту та рекомендації щодо впровадження результатів дослідження.....	156
4.4 Висновок за розділом.....	163
Висновки .....	165
Список використаних джерел .....	167
Додаток А Акти впровадження результатів дослідження .....	180
Додаток Б Список публікацій за темою дисертації та відомості про апробацію результатів дисертації.....	184
Додаток В Лістинг програми (фрагмент) .....	187

## ВСТУП

### **Актуальність теми.**

Сучасний етап розвитку транспортних систем міст характеризується переходом від стабільних умов функціонування до стану екстремальної невизначеності, спричиненої інтенсивними зовнішніми воєнними впливами. У таких умовах традиційні підходи до організації логістичних процесів, що базуються на жорсткому дотриманні графіків (Just-in-Time) та мінімізації витрат, виявляються малоефективними. Повітряні тривоги, руйнування інфраструктури та раптові блокування транспортних артерій призводять до критичних збоїв у ланцюгах постачання товарів першої необхідності.

Необхідність забезпечення безперервності доставки вантажів вимагає перегляду теоретико-методологічних засад логістичного управління. Актуальним стає перехід до робастного планування, яке дозволяє враховувати імовірнісний характер загроз та інтегрувати чинники безпеки безпосередньо в математичні моделі маршрутизації. Розробка інструментарію, що поєднує методи геопросторового аналізу та імітаційного моделювання для мінімізації впливу воєнних ризиків, визначає актуальність та своєчасність теми дисертаційного дослідження.

### **Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.**

Дисертаційна робота відповідає пріоритетним напрямкам **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 організації та логістичного управління процесом доставки вантажів у міських умовах шляхом розробки моделей і методів маршрутизації,

що враховують динамічний вплив зовнішніх воєнних ризиків для формування робастних маршрутних рішень та мінімізації вартісної експозиції ризиків.

Для досягнення поставленої мети визначено наступні **задачі**:

- проаналізувати сучасний стан та тенденції розвитку логістичних систем, виявити критичні чинники дестабілізації транспортних процесів в умовах воєнних загроз та обґрунтувати необхідність переходу від детермінованих до робастних підходів у плануванні доставки;
- розробити науково-методичний підхід до формування «безпекового каркаса» транспортної мережі міста на основі методів геопросторового аналізу та імовірнісного моделювання полів ризику для кількісного оцінювання впливу воєнних інцидентів на логістичні витрати;
- розробити математичну модель маршрутизації, яка інтегрує вартісну оцінку воєнних ризиків та часових втрат під час повітряних тривог безпосередньо у загальну структуру логістичних витрат;
- здійснити програмну реалізацію симуляційно-евристичного алгоритму та провести експериментальну перевірку запропонованих рішень для верифікації ефективності робастного планування доставки вантажів в умовах випадкових зовнішніх впливів.

**Об’єкт дослідження** – процес організації та логістичного управління доставкою вантажів автомобільним транспортом у міській транспортній мережі за умов воєнних ризиків та операційної невизначеності.

**Предмет дослідження** – методичний апарат та математичні моделі робастної маршрутизації транспортних засобів у міській логістичній системі на основі вартісної інтеграції просторово-часових воєнних ризиків.

**Методи дослідження.** Теоретичною базою є положення теорії транспортних систем, логістики та управління ризиками. Використано методи теорії графів (для моделювання мережі), ядерне згладжування щільності (KDE) для побудови полів ризику, методи робастної оптимізації (для маршрутизації), імітаційне моделювання за методом Монте-Карло (для

верифікації рішень). Програмна реалізація виконана мовою Python із використанням бібліотек Pandas, Folium та NumPy.

**Наукова новизна отриманих результатів** полягає в тому, що :

– *вперше* розроблено метод формування ризик-орієнтованої вартості проходження ділянок міської транспортної мережі, який, на відміну від існуючих методів маршрутизації, додатково оцінює просторово-часову інтенсивність воєнних загроз, імовірність блокування ділянок маршруту та очікувані втрати від вимушених простоїв, що дозволяє обирати маршрут за інтегральним критерієм логістичних витрат з урахуванням безпекової складової;

– *набув подальшого розвитку* методичний підхід до оцінювання ефективності та робастності маршрутних рішень у міській логістичній мережі, який, на відміну від існуючих поєднує геопросторове моделювання зон ризику, графову модель транспортної мережі та сценарну імітаційну перевірку маршрутів за умов збоїв, що дозволяє порівнювати альтернативні маршрути за витратами, часовими втратами, ризиковою експозицією та ймовірністю успішного виконання доставки;

– *удосконалено* математичну модель маршрутизації вантажних автомобільних перевезень у міських умовах, яка, на відміну від відомих моделей маршрутизації, доповнена безпековою компонентою цільової функції, що забезпечує переоцінку ваг дуг транспортного графа залежно від рівня воєнного ризику та дає змогу формувати робастні маршрути, що мінімізують вартісну експозицію ризику за умов просторово-часової невизначеності.

*Практичне значення одержаних результатів* полягає у створенні та впровадженні дієвого програмно-методичного інструментарію для логістичних підрозділів і транспортних компаній, що функціонують у середовищі з високим ступенем небезпеки. Ключовим прикладним результатом дослідження є система підтримки прийняття рішень, розроблена мовою Python, яка дозволяє в автоматичному режимі здійснювати оперативне

планування та корегування планів доставки вантажів у режимі реального часу. На відміну від стандартних систем управління транспортом, цей інструментарій забезпечує диспетчерському апарату можливість враховувати інтенсивність зовнішніх воєнних впливів, тривалість повітряних тривог та ймовірність раптового блокування транспортних шляхів для негайної адаптації маршрутів.

Важливим результатом є методика кількісного оцінювання воєнної складової витрат, що надає підприємствам можливість здійснювати точне ціноутворення та превентивно розраховувати обсяги додаткових ресурсів, необхідних для компенсації збитків від збоїв у роботі міської інфраструктури. Також у межах роботи розроблено програмний модуль для побудови динамічних карт ризику на основі методу ядерного згладжування щільності, що дає змогу візуалізувати найбільш небезпечні ділянки мережі міста та обґрунтувати вибір альтернативних траєкторій руху з мінімальним рівнем загрози.

Окремим результатом є впровадження алгоритму ітераційної верифікації рішень методом Монте-Карло, що дозволяє заздалегідь оцінити здатність логістичного ланцюга до успішного функціонування під тиском безпекових чинників. Одержані результати можуть бути використані муніципальними службами та приватними перевізниками для мінімізації негативних наслідків від дій воєнного характеру та підтримки життєздатності міської логістичної системи.

Результати дисертаційної роботи впроваджені у навчальний процес у Харківському національному автомобільно-дорожньому університеті у лекційних курсах «Вантажні перевезення», та у дипломне проектування для студентів, що навчаються за спеціальністю J8 «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 **4 статті у фахових виданнях**. У працях, опублікованих у співавторстві, здобувачем розроблено математичні моделі та здійснено їх програмну реалізацію.

**Обґрунтованість та достовірність** отриманих наукових положень забезпечується використанням фундаментальних положень теорії транспортних систем, логістики та управління ризиками. Наукові положення ґрунтуються на коректному застосуванні математичного апарату, зокрема методів теорії графів для моделювання транспортної мережі, методу ядерного згладжування щільності для побудови імовірнісних полів ризику та методів робастної оптимізації при формуванні маршрутів доставки.

Достовірність отриманих результатів підтверджується використанням репрезентативного обсягу статистичних даних про воєнні інциденти та параметри функціонування транспортної мережі міста Харкова, а також результатами серії імітаційних експериментів. Валідність розроблених моделей і алгоритмів верифікована за допомогою методу Монте-Карло, що дозволило встановити високий рівень збіжності теоретичних розрахунків із практичними показниками функціонування логістичних ланцюгів у кризових умовах.

Обґрунтованість практичних рекомендацій підтверджується позитивними результатами впровадження розробленої системи підтримки прийняття рішень у діяльність транспортно-експедиційних компаній, а також апробацією основних положень дослідження на міжнародних та всеукраїнських науково-практичних конференціях і публікацією результатів у фахових наукових виданнях. Програмна реалізація моделей мовою Python із використанням сучасних об'єктно-орієнтованих бібліотек забезпечує відтворюваність та коректність проведених розрахунків..

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

- IV міжнародній науково-практичній інтернет-конференції «Напрями розвитку технологічних систем і логістики в АПВ» 20 квітня 2023 р., Україна, Харків, ДБТУ;
- 86-й науково-технічній та науково-методичній конференції університету (ХНАДУ). Секція транспортних технологій. 10-11 травня 2023 року. Харків;
- 79-й науковій конференції професорсько-викладацького складу, аспірантів, студентів та співробітників відокремлених структурних підрозділів університету збірник тез доповідей. Київ: НТУ, 2023.
- міжнародній науково-технічній конференції «Розумний транспорт та інтегровані транспортні технології», Х:ХНАДУ, 2023 р.
- 5-й міжнародній науково-технічній конференції «Інтелектуальні транспортні технології», Харків, 25–27 листопада 2024 р. УкрДУЗТ.
- IX міжнародній науково-практичній конференції «Topical aspects of modern scientific research», 16-18.05.2024, Токіо, Японія
- 21st Scientific and technical conference transport systems theory and practice, Katowice, September 9-10, 2025.

**Публікації.** Результати наукових досліджень за темою дисертаційної роботи опубліковані в 12 друкованих працях, із них: 4 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; 7 у збірках праць за матеріалами наукових конференцій.

**Структура дисертації.** Дисертація складається з вступу, чотирьох розділів, загальних висновків, бібліографії з 102 найменування і 3 додатків. Загальний обсяг роботи складає 192 сторінки, у тому числі 153 сторінки основного тексту, 28 рисунків, 25 таблиць.

## РОЗДІЛ 1

### ОГЛЯД СУЧАСНОГО СТАНУ ТЕОРІЇ ТА ПРАКТИКИ ОРГАНІЗАЦІЇ ВАНТАЖНИХ ПЕРЕВЕЗЕНЬ В МІСЬКОМУ СПОЛУЧЕННІ

#### 1.1 Інтеграція логістики, цифрова трансформація та сталий розвиток міст

Інтеграція логістики та транспорту є не просто операційною метою, а стратегічним імперативом, що визначає національну конкурентоспроможність, якість міського життя та економічну стійкість. Ефективні міські вантажні перевезення функціонують як кровоносна система економіки сучасного міста, забезпечуючи його життєдіяльність. У цьому контексті виникає спеціалізована галузь «міська логістика», спрямована на оптимізацію цих потоків в умовах зростаючих викликів, таких як перевантаженість транспортних мереж, забруднення довкілля та підвищення споживчих очікувань, зумовлених стрімким розвитком електронної комерції. Особливо гострою є проблема «останньої милі» – найскладнішого та найдорожчого сегмента ланцюга постачання, на який припадає значна частка загальних витрат.

Система міської логістики України являє собою унікальний випадок «комплексної складності». Вона стикається не лише з типовими для країн що розвиваються проблемами, таких як інфраструктурний дефіцит та регуляторні прогалини, але й із катастрофічними та системо утворюючими наслідками повномасштабної війни. Руйнування інфраструктури, зміна вантажопотоків та гуманітаризація логістики докорінно трансформували галузь, створивши безпрецедентні виклики.

В умовах глобалізації ринків та ускладнення ланцюгів постачання, ефективна інтеграція логістики та вантажного транспорту стає не просто операційною перевагою, а стратегічним імперативом, що визначає конкурентоспроможність як окремих підприємств, так і національних економік. Традиційні підходи, що характеризуються фрагментацією процесів,

високими витратами та низькою ефективністю, вичерпують свій потенціал. Сучасний етап розвитку вимагає переходу до нової парадигми, рушійною силою якої є цифрова трансформація. Ця трансформація втілюється у концепції «Логістика 4.0», що передбачає глибоку синергію фізичних процесів та передових інформаційних технологій для створення гнучких, прозорих та адаптивних логістичних систем [1].

Інтеграція ланцюга постачання визначається як ступінь стратегічної співпраці між партнерами для управління внутрішніми та зовнішніми процесами з єдиною метою [2]. Ключова ідея полягає в оптимізації всієї системи, а не її окремих підсистем, що дозволяє приймати зважені рішення на основі спільної інформації та скоординованих дій [3]. Аналіз наукових джерел дозволяє декомпонувати інтеграцію на три взаємопов'язані виміри, що відповідають ключовим потокам у ланцюгу постачання [1–3]:

- інформаційна інтеграція, координація інформаційних потоків, що передбачає обмін даними про попит, виробничі плани, рівень запасів та статус відвантажень, це основа для прийняття обґрунтованих рішень;
- матеріальна інтеграція, координація фізичних потоків товарів та послуг, що охоплює логістику, операційну діяльність, транспортування та складування, метою є створення безперебійного руху матеріальних ресурсів;
- фінансова інтеграція, координація фінансових потоків, включаючи процеси оплати, розподіл витрат та прибутків між партнерами, що сприяє підвищенню довіри та стабільності у відносинах.

Інтеграція логістики знайшла своє продовження та розвиток у концепції управління ланцюгами постачань (Supply Chain Management, SCM) [4]. SCM – це системний підхід до інтегрованого планування й управління всіма потоками інформації, матеріалів і послуг між кінцевими споживачами та постачальниками. Ця концепція виходить за рамки простих операцій транспортування та складування, охоплюючи вісім ключових бізнес-процесів, які потребують інтеграції для досягнення максимальної ефективності (табл. 1.1) [5].

Таблиця 1.1 – Моделі інтеграції ланцюга постачань та їхні складові

Бізнес-процес	Опис	Мета
1	2	3
Управління взаємовідносинами зі споживачами	Встановлення, ідентифікація та сегментація ключових споживачів і споживчих груп	Підвищення якості комунікацій, краще прогнозування попиту
Обслуговування споживачів	Передача та отримання інформації про заплановані дати поставок, наявність продукції та операції	Надання інформації в режимі реального часу, допомога в розміщенні замовлень, підвищення задоволеності клієнтів
Формування попиту	Дії, спрямовані на визначення, що і коли придбають споживачі	Регулювання споживчих запитів, синхронізація попиту з виробничими можливостями, зниження невизначеності
Виконання замовлень	Процес переміщення товару та послуг від постачальників до клієнтів	Ефективна та своєчасна доставка продуктів і послуг

Продовження таблиці 1.1

1	2	3
Управління виробничими потоками	Управління виробничим процесом з урахуванням попиту та наявності запасів	Забезпечення безперебійного та ефективного виробництва
Управління взаємовідносинами з постачальниками	Налагодження довгострокових партнерських взаємин із ключовими постачальниками	Оптимізація закупівельних процесів, підвищення надійності поставок
Розробка та комерціалізація продукції	Координація розробки нових продуктів з урахуванням можливостей всього ланцюга постачання	Прискорення виходу нових продуктів на ринок, мінімізація ризиків
Управління поверненнями	Організація процесу повернення та переробки пакування і відходів	Оптимізація зворотної логістики, підвищення ефективності та стійкості логістичної системи

Інтеграція цих процесів перетворює логістику з сукупності розрізнених операцій на взаємопов'язану екосистему. Це свідчить про перетворення логістики з «допоміжної функції» на ключовий стратегічний інструмент бізнесу, який активно бере участь у прогнозуванні попиту, управлінні

відносинами з клієнтами та досягненні синергії, що виходить за межі простої оптимізації витрат.

Сталі міські логістичні плани є стратегічними рамками, розробленими для оптимізації транспортування товарів у межах міських територій. Їхня мета полягає у зменшенні впливу на довкілля, підвищенні ефективності та покращенні якості життя. Ці плани є ключовим інструментом для інтеграції логістики в ширші міські стратегії.

Існуючі рекомендації щодо сталої міської логістики потребують оновлення для включення нових елементів та підходів, що відображають останні інновації (рис. 1.1). Зокрема, це стосується інтеграції міської логістики в місцеві стратегії та міську політику, що виходить за межі суто мобільності та транспортного сектору. Це включає планування відновлюваної енергії для зарядних/заправних інфраструктур, а також планування міського простору та землекористування для інтеграції потреб вантажних велосипедів, управління логістикою будівельних майданчиків та ідентифікації громадських ділянок для потенційних логістичних хабів [6]. Важливим аспектом є безперервний моніторинг та оцінка реалізації сталої міської логістики за допомогою ключових показників ефективності (KPI) для оцінки середньо та довгострокових наслідків та тенденцій.

Оптимізація міських вантажних перевезень є складним завданням, що враховує численні фактори, такі як дорожній рух, затори, безпека та енергозбереження, в контексті ринкової економіки. Ця оптимізація має вирішальне значення для підвищення ефективності та сталості міських логістичних систем.

Серед ключових тенденцій у цій галузі виділяються проблеми маршрутизації транспортних засобів (VRP) та проблеми маршрутизації запасів (IRP), які є основними для організації схем доставки та мінімізації витрат на дистрибуцію. Ці проблеми вимагають складних алгоритмів для пошуку оптимальних рішень.

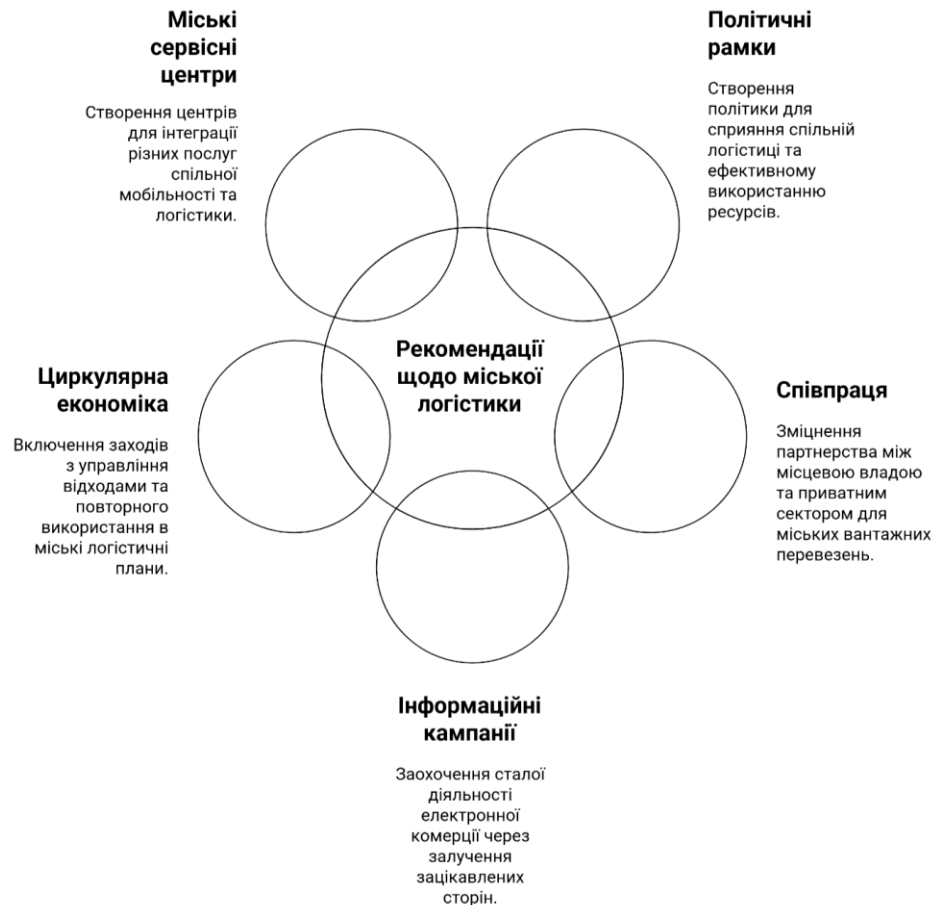


Рисунок 1.1 – Ключові напрями вдосконалення міської логістики

Важливу роль у сприянні оптимізації відіграють передові інформаційні системи. Вони дозволяють збирати та аналізувати дані в реальному часі, що є основою для прийняття обґрунтованих рішень. Ітераційні алгоритми вирішення та автоматизовані інструменти підтримки прийняття рішень також є цінними для планування та управління міськими вантажними перевезеннями.

Перехід до альтернативних силових установок, таких як акумуляторні електричні вантажівки, та відповідні політичні втручання (субсидії, дорожні збори, акцизи) є ключовими для декарбонізації та забезпечення сталості транспорту. Ці заходи спрямовані на зменшення викидів парникових газів та покращення якості повітря в містах.

Оптимізація міських вантажних перевезень стає все більш складною, виходячи за межі простого скорочення витрат. Вона включає інтеграцію

екологічних та соціальних факторів, що зумовлено технологічними досягненнями та змінами в політиці. Наприклад, впровадження електричних транспортних засобів та необхідність державних субсидій або податкових пільг для забезпечення їхньої конкурентоспроможності ілюструють цей багатогранний виклик оптимізації. Це означає, що ефективні рішення вимагають не лише технічних інновацій, а й скоординованих зусиль з боку уряду, бізнесу та суспільства для формування сприятливого середовища.

Міські вантажні перевезення демонструють стійку тенденцію до зростання, що зумовлено низкою ключових чинників. Серед них виділяються зростання населення, урбанізація, ущільнення забудови, глобалізація, розвиток онлайн-торгівлі та роздрібного продажу, а також загальний економічний розвиток міст. Ці фактори створюють постійно зростаючий попит на доставку товарів у міські райони.

Компанії активно впроваджують цифрові технології для задоволення потреб клієнтів, пропонуючи індивідуальні продукти та вивчаючи ринкові ніші. Зростає тенденція до інтеграції та співпраці між учасниками ланцюга поставок для покращення показників сталості. Бізнеси вдосконалюють свої процеси та управління запасами, щоб прогнозувати та задовольняти потреби споживачів, одночасно зменшуючи вплив на довкілля.

Щодо перевізників, спостерігаються наступні тенденції:

- використання передових інформаційних систем для оптимізації логістики та транспортування, враховуючи трафік, затори, безпеку та енергозбереження;
- проблеми маршрутизації транспортних засобів та проблеми маршрутизації запасів є ключовими для організації схем доставки та мінімізації витрат на дистрибуцію;
- попит на прискорену та безкоштовну доставку призводить до деконсолідації товарів та низького коефіцієнта завантаження транспортних засобів, збільшуючи викиди та операційні витрати;

- зростання міського населення призвело до значного збільшення кількості посилок для домашньої доставки та вантажного трафіку;
- проблеми з доступом до узбіччя та паркуванням погіршуються через регуляторні обмеження та відсутність спеціалізованої логістичної інфраструктури, що призводить до збільшення відстаней пробігу та викидів;
- впровадження автоматизації, електрифікації та спільної мобільності для зменшення неефективності та вирішення проблем доставки «останньої милі»;
- поява альтернативних методів доставки, таких як платформи доставки на основі додатків, крауд-шипінг та низько емісійні транспортні засоби малого обсягу, вантажні велосипеди.

Декарбонізація міської логістики є нагальною необхідністю, оскільки транспортний сектор є домінуючим джерелом викидів парникових газів і значно сприяє глобальному потеплінню та забрудненню повітря. Зростання міського населення та попиту на доставку, особливо в секторах електронної комерції та онлайн-доставки продуктів харчування, посилює тиск на міську логістику, що призводить до збільшення заторів та, як наслідок, до вищих викидів парникових газів. Основні проблеми у декарбонізації міської логістики представлені на рисунку 1.2.

Рішення для декарбонізації міської логістики зосереджені на оптимізації та інтеграції інноваційних підходів:

- краудсорсинг/краудшипінг, залучення громадських водіїв як кур'єрів для доставки онлайн-замовлень, що створює нові робочі місця та допомагає задовольнити зростаючий попит;
- системи доставки на базі метро та поштомати, сталі альтернативи для міської логістики, часто в поєднанні з велосипедами;
- центри міської консолідації, оптимальний вибір розташування цих центрів є важливим рішенням;
- спільне використання видів транспорту, поєднання різних видів транспорту для вантажних та пасажирських перевезень.



Рисунок 1.2 – Основні чинники впливу на зростання викидів від транспортно-логістичної діяльності в містах

Хоча технологічні рішення для декарбонізації міської логістики активно розвиваються, їх успішне впровадження ускладнюється значними економічними та інфраструктурними бар'єрами. Крім того, часто ігноруються вирішальні соціальні та культурні аспекти. Це означає, що для справді ефективних та застосовних стратегій декарбонізації необхідний цілісний підхід. Наприклад, рішення, що не враховують унікальні культурні особливості міста, можуть виявитися неефективними, незалежно від їхньої технічної досконалості.

Майбутнє міської логістики характеризується складною взаємодією технологічних інновацій, політичних втручань та геополітичних реалій. Успіх залежатиме від багатосторонньої співпраці між державним та приватним секторами, прийняття рішень на основі даних та цілісного розуміння сталості, що охоплює економічні, екологічні, соціальні та культурні аспекти.

## 1.2 Ключові концепції та стратегії управління міськими вантажними перевезеннями

В даний час більша частина розподілу вантажів у містах здійснюється приватними компаніями, як правило міськими логістичними операторами або постачальниками товарів з використанням спеціального парку транспортних засобів, що працюють на паливі. Проблема характеризується величезною кількістю дрібних замовлень (за обсягом та вагою), які повинні бути доставлені величезній кількості клієнтів та в роздрібну торгівлю які розосереджені по місту, перевезення вантажів здійснюється застарілими не ефективними транспортними засобами, доставка вантажу відбувається у час пік завантаження міської інфраструктури [7]. Транспортні компанії стоять перед величезним завданням оптимізації щоденних завантажень, щоб уникнути порожніх або частково порожніх пробігів. Крім того, на деяких вулицях міста зазвичай є обмеження доступу, що створює обмеження на типи транспортних засобів, які можна використовувати.

Для вирішення даних проблем застосовують концепцію міська логістика. Міська логістика полягає в координації та оптимізації інформаційних, фінансових та матеріальних потоків, узгодженні їх з ринковою кон'юнктурою та виробничим потенціалом міської системи, здійсненні вантажних перевезень для забезпечення життєвої діяльності міста, узгодженні спільних інформаційних технологій [8]. Основним завданням міської логістики є підвищення ефективності та результативності роботи вантажовідправників, постачальників, послуг і клієнтів (рис. 1.3). В роботі [9] міську логістику розділяють на два концептуальних поняття такі як «city logistic» та «urban logistic», різниця між ними полягає в тому що перше поняття відноситься до організації перевезень безпосередньо в центрі міста, а друге охоплює все місто. Такий підхід не є ефективним і вирішує проблеми організації лише на окремих рівнях, для більш ефективного вирішення

проблем організації міських вантажних перевезень необхідно використовувати комплексний підхід і охоплювати рішення всіх проблем.



Рисунок 1.3 – Структура концепції міської логістики

Сучасна міська логістика трансформується у складні багатокомпонентні транспортно-логістичні системи. Їх функціонування ґрунтується на принципах консолідації потоків і характеризується високим ступенем гетерогенності стейкхолдерів, багаторівневою ієрархією об'єктів та інтеграцією різноманітних модальностей перевезень [10]. Подібно до будь-якої складної транспортної системи, транспортні системи міської логістики вимагають вирішення заходів на стратегічному, тактичному та оперативному рівнях прийняття рішень [11].

Під стратегічними заходами необхідно розуміти визначення мети та завдань стосовно розвитку вантажних перевезень на довгостроковий період.

Оперативне виконують вирішення проблем по мірі їх виникнення або в випадках відхилення від основної мети. Тактичні мають під собою конкретні дії направлені на втілення стратегічної мети.

Функціонування міської інфраструктури характеризується синхронністю процесів пасажирських і вантажних перевезень, а також роздрібною торгівлі. Ця синергія охоплює комплекс детермінант політичного, соціально-економічного та стратегічного характеру, що потребує інтегрованого підходу до управління міським середовищем [9]. Завдяки цьому логістика тісно переплітається зі інфраструктурою міста: транспортними системами, вузлами та складами як на периферії міста так і в центральній частині, з архітектурою міста та її екологією. Для вирішення проблем в місті підхід має бути комплексний та глобальний з залученням всіх зацікавлених сторін та міських установ які постійно взаємодіють між собою і впливають на ухвалення рішення щодо розвитку міста та міської логістики.

В роботах [12-15] автори виділяють наступні міри міської логістики:

- управління процесом доставки вантажів через райони міста: доступ вантажним транспортним засобам в певні періоди часу; ведення обмеження на габаритні розміри вантажних транспортних засобів; перехід на більш екологічні транспортні засоби; використання центрів консолідації на території міста з використанням малогабаритних транспортних засобів з максимальною завантаженістю їх для виконання доставки за концепцією остання миля, введення плати за проїзд вантажним транспортом по вулицям міста та за перевантаження;

- інфраструктура: використання мережевих зон доставки вантажів на обмежених територіях руху вантажних транспортних засобів; використання при доставці вантажів центрів консолідації на периферіях міста до мережі центрів в місті та доставка до ближніх секторів (доставка вантажу відбувається на двох рівнях, на першому рівні відбувається перевезення вантажу на дальні відстані з центрів консолідації на межах міста, на другому рівні автомобілі середньої вантажності доставляють вантаж в центри консолідації потім

використовуються автомобілі з маленькою вантажністю для доставки вантажу до кінцевого споживача), використання міського кросдокінгу;

- використання інформаційних технологій та інтелектуальної транспортної системи для підвищення ефективності надання послуг та логістичних процесів з метою зниження витрат на доставку вантажів, та розширити сферу застосування інформаційних технологій. Використання спеціальних застосунків та веб-сервісів для обміну інформацією між учасниками та управлінням процесом, управління дорожнім рухом та його контроль;

- регулювання попиту на транспортні послуги шляхом забезпечення раціонального розподілу навантаження на транспортні засоби в межах логістики «останньої милі»;

- застосування екологічно чистих вантажних транспортних засобів з нульовим рівнем викидів або обмеження доступу до відповідних транспортних районів авто з екологічними проблемами.

У роботі [16] автори виділяють деякі характерні відмінності транспортних засобів та заперечливі рішення щодо міської логістики для обмеження шкідливого впливу, такі як: зонування транспортних районів міста та проїзд ними в певний часовий період, обов'язкова співпраця між державними та приватними секторами.

При оптимізації логістичного управління процесом перевезення вантажу від вантажовідправника до вантажоодержувача головним завданням є знаходження компромісу між потребами та доступністю ресурсів для задоволення потреб замовників транспортних послуг. Концепція стійкого розвитку з точки зору транспорту завжди розглядається з трьох сторін: соціальної, економічної та екологічної, неможливо виокремлювати жодну сторону так як вони взаємозалежні. В роботі [17] досліджується взаємозв'язок між основними аспектами стійкого розвитку транспорту і автори виділяють екологічну сторону як найбільш вагому до соціуму у порівнянні с економічною.

Головну мету цієї концепції можливо розкрити одним запитанням: як організувати процес перевезення вантажу найефективнішим способом з точки зору економічності та екологічності [18]. З економічної сторони робота транспортної компанії є стійкою коли дохід покриває витрати, з екологічної коли зменшується кількість негативного впливу на навколишнє середовище.

Концепція логістика сталого розвитку вирішує наступні питання [19]:

- зменшення витрат пов'язаних з недостатньою ефективністю організації логістичного процесу;
- продуктивне застосування енергетичних, матеріальних, складських та автотранспортних ресурсів при виконанні процесу перевезення;
- зменшення негативного впливу на навколишнє середовище;
- розробка та використання інновацій на основі інформаційних технологій в процес організації та управління міськими вантажними перевезеннями.

Все частіше споживачі використовують електронну комерцію для задоволення своїх потреб, у зв'язку з цим збільшилась завантаженість транспортної системи міста через ритмічність перевезення вантажів що призводить до заторів у години пік, та викиду в навколишнє середовище вихлопних газів, висувають потреби до екологічної безпеки використаних товарів, їх упакування, перевезення та повторного використання, через це виробникам та перевізникам доводиться додержуватися екологічних вимог. Концепція зеленої логістики направлена на вирішення екологічних проблем при доставці вантажів споживачам з використанням еко технологій, виділення параметрів ефективності дає змогу досягнути наслідки та виділити області оптимізації [20, 21].

Авторами [22, 23] виділено основну мету екологістики яка полягає в взаємодії трьох основних аспектів на логістичний процес організації перевезень вантажів, з використанням ресурсозберігаючих технологій. Автори вважають що запровадження даної концепції в транспортну компанію підвищить продуктивність логістичних процесів та зменшить негативний вплив на

навколишнє середовище, тим самим підвищить якість надання послуг клієнтам та надасть можливість зберегти природні ресурси. На рисунку 1.4 наведені основні принципи функціонування екологістики [21, 24, 25]. Водночас варто зауважити, що імплементація зазначеної концепції не завжди є економічно доцільною для транспортного підприємства. Зокрема, перехід на екологічно чистий вантажний транспорт пов'язаний з істотними капітальними та операційними витратами на його обслуговування [26].

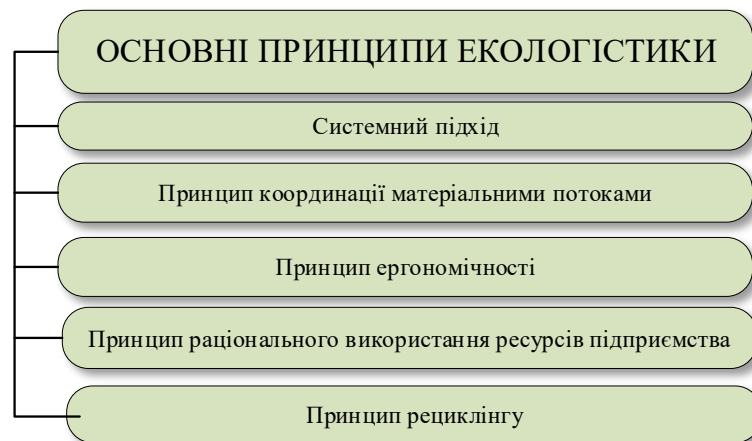


Рисунок 1.4 – Концептуальні рамки екологістики

Екологістика тісно переплітається зі сталим розвиток, впровадження рішень даної концепції дає змогу досягати основної мети сталого розвитку. Складова економічності направлена на підвищення ефективності надання транспортно-логістичних послуг, максимально ефективного використання складської площини, заохочення від державних органів використання зеленого транспорту. Головний напрям соціальної складової це безпека перевезення та споживання товарів, впровадження систем еко-менеджменту. Екологістика це використання транспортних засобів з альтернативним видами палива або використання міського громадського транспорту для доставки вантажу, еко-керування, це дає змогу зменшити кількість транспортних засобів на дорогах тим самим зменшується негативний вплив на навколишнє середовище [27-28].

В області екологістики досліджувались такі напрями вирішення питань з ефективною організацією процесу доставки вантажів та зменшення шкідливих викидів (рис. 1.5) [29-31].



Рисунок 1.5 – Ключові заходи в еко логістиці

В дослідженні [32] автори провели імітаційне моделювання доставки вантажів через транспортну систему міста Познань, з використанням альтернативного виду транспорту такого як вантажні трамваї. Доставка вантажів в роздрібну торгівлю з змінним попитом відбувається в нічний термін з розподільчих центрів які знаходяться на околицях міста та мають колії для під'їзду трамваїв, це дає змогу зменшити кількість вантажних транспортних засобів на дорогах в час пік, також знижується шум та шкідливі викиди в навколишнє середовище. Автори засвідчують що впровадження еко-принципів в організацію процесу перевезення вантажів та використання не тільки вантажних автомобілів а інших видів транспорту визначають стійкий розвиток екологічних ланцюгів постачання [33].

В роботі [34] розроблено модель змішаного цілісного програмування для оперативного планування міської логістичній службі, з використанням екологічно чистих міських громадських автобусів щоб забезпечити доставку

деяких видів товарів на «останній милі». Ця послуга поширюється на приватних клієнтів або організацій, також для доставки посилок в роздрібну торгівлю. Данна модель виконує збалансування навантаження на пропускну здатність міської транспортної системи, а також розрахунок необхідного часу на обслуговування клієнтів. Мінусом даної моделі є те що вона носить лише теоретичний характер і ніяк не підкріплена практично та не показує ефективність використання даного підходу до організації міських вантажних перевезень. Також такий метод змішаного перевезення пропонують автори роботи [35], вантаж перевозиться автобусами в невеликих контейнерах з центрів консолідації до центра міста де перевантажуються на вантажні автомобілі малої габаритності, які в свою чергу доставляють товар до споживачів в конкретні часові проміжки, якщо авто прибуває раніше то йому доводиться очікувати конкретного часу видачі товару, що в свою чергу призводить до неефективних простоїв. Найбільш обґрунтовану модель інтеграції вантажного та пасажирського транспорту представлено у праці [36]. Автори пропонують концепцію інтегрованої системи, в якій логістичні процеси та пасажиропотоки реалізуються за допомогою уніфікованих транспортних засобів у межах єдиної міської інфраструктури. Доведено, що комплексний підхід до організації змішаних перевезень забезпечує мінімізацію витрат усіх стейкхолдерів, сприяє покращенню екологічної ситуації та підвищенню соціальної ефективності міського середовища.

За останній час значних обертів в розвитку набирає новий підхід в вирішенні проблем з екологією ESG (Environmental, Social, Corporate Governance), транспортні компанії беруть активну участь у покращенні екологічних умов та підвищенні якості надання послуг клієнтам за рахунок переходу на альтернативні види транспорту або авто з менш шкідливими двигунами, для зменшення вібрацій та шуму в місті [37].

В роботах [38, 39] виділяються проблеми впровадження зеленої концепції в Україні, неефективне державне регулювання екологічних питань, та нечіткість методів використання даної концепції в транспортних компаніях,

не стимулювання державними органами впровадження екологістики, відсутність взаємозалежностей між зеленими принципами перевезення вантажів та фінансовими витратами, недостатність інвестування державою в екологічно чисті системи доставки вантажів.

Імплементация концепції екологічної логістики та інтеграція сучасних трендів, таких як відповідальне споживання та урахування глобальних екологічних викликів, дозволяє транспортним компаніям забезпечити ефективну диференціацію на ринку послуг. Дотримання високих екологічних стандартів при організації процесів транспортування суттєво посилює конкурентоспроможність підприємства, сприяє розширенню клієнтської бази та позитивно корелює з показниками його фінансової ефективності.

При доставці вантажів в міських умовах виділяють останню милю як саме дорожчу ділянку перевезення, остання миля це заключний етап доставки вантажу вантажоодержувачу, яка має значний вплив на якість надання транспортних послуг та впливає на імідж транспортної компанії [40]. Зі збільшенням попиту на доставку інтернет замовлень в великих містах за останній час призвело до активного розвитку логістики останньої милі [41]. Основною проблемою даної доставки є те що компанії скорочують час перевезення продукції а споживачі готові платити більше за зменшення терміну, тому транспортні компанії щоб лишатися конкурентними на ринку транспортних послуг мають в короткі терміни адаптувати систему доставки, найбільшим мінусом від цієї тенденції є те що приходиться випускати на лінію автомобілі с неповною завантаженістю.

Зазвичай в міській логістиці центри консолідації розташовуються на околицях міста де вантаж накопичується потім консолідується по напрямкам або районам і доставляється споживачу (рис. 1.6).

Недоліками даної системи є [42-44]:

- при доставці використовується транспорт великої вантажності, якому в'їзд в місто заборонено;

- збільшується кількість вантажного транспорту як в центрі міста так і в інших районах через нераціональну організацію процесу перевезення;
- збільшення сумарної відстані пройденої транспортними засобами через низький рівень транспортної інфраструктури призводить до збільшення витрат;
- така система доставки підходить не для всіх типів вантажів (доставка залежить від термін поставки та виду вантажу), необхідність вкладання значних коштів для функціонування центру;
- збільшення кінцевої ціни на товар через значні витрати на консолідацію.

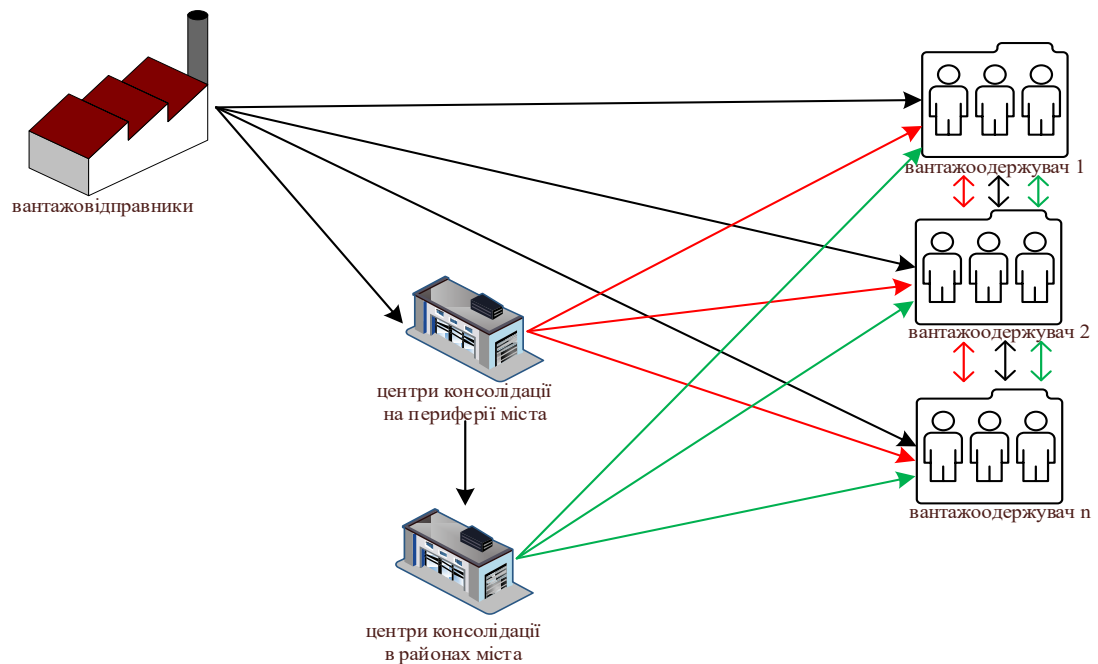


Рисунок 1.6 – Класична модель міської логістики

Перевагами використання центрів консолідації при перевезенні вантажів в міській транспортній системі є [43, 45]:

- зменшення питомих витрат на етапі доставки остання миля, ефективне використання вантажопідйомності автомобіля, зменшення кількості порожніх пробігів;

- гнучкість поставок дрібними партіями яка призводить до зменшення витрат на зберігання вантажів на складі у вантажоодержувача;
- зменшення впливу на навколишнє середовище, вантажних автомобілів на дорогах міста та заторів, використання екологічно чистих видів транспорту.

В дослідженні [46] розроблено модель перевезення вантажів на основі концепції екологістики на заключному етапі де для консолідації вантажів використовується екологічний розподільчий центр який розташований як на околицях міста так і в центральних частинах містах, тобто вантаж відправляється на аутсорсинг до сторонньої компанії з залученням до перевезення електромобілів, це дозволяє зменшити шум та завантаженість транспортної системи, недоліком цієї роботи є те що автори не враховують фінансову ефективність запропонованої моделі.

Для консолідації товарів на заключному етапі доставки вантажу до споживача так званої останньої милі використовують мікрохаби або мікродепо, які територіально розташовані в міських кварталах [47]. Відмінністю мікрохаба від класичного консолідованого центру є місце їх розташування, мікрохаби розташовані поблизу місця обслуговування наприклад торгівельний центр з якого відбувається консолідовані доставки в наближені райони.

Транспортні компанії в основному їх використовують для зберігання та консолідації товарів на етапі остання миля, розташування їх поблизу до споживачів дозволяє використовувати для доставки екологічні види транспорту такі як малогабаритні електричні вантажні авто та електричні вантажні велосипеди і навіть доставку пішохідним транспортом [48, 49], автори вважають завдяки використанню цих мікрохабів знижується вплив на навколишнє середовище, зменшується завантаженість транспортної системи міста, зменшується час доставки що задовольняє потреби споживачів [50]. Ефективність виконання обробки вантажів в центрах консолідації напряду впливає на рентабельність міських перевезень на засадах логістикиУ

дослідженні [51] проаналізовано залежність операційних витрат на доставку вантажів при застосуванні концепції мікрохабів та електричних транспортних засобів. Шляхом зіставлення із традиційною моделлю централізованого розподільчого центру автором доведено суттєве зменшення логістичних витрат у разі використання децентралізованої схеми та екологічно чистих видів транспорту.

Від'ємністю проаналізованих робіт є те що автори незважаючи на значні екологічні переваги використання електричних вантажних авто не враховують той факт що для виготовлення електричних авто та їх експлуатації використовується багато електроенергії яка виробляється в основному на викопному паливі і негативно впливає на навколишнє середовище, і ще ККД (коефіцієнт корисної дії) звичайного вантажного транспорту нижче в два рази від загального ККД електричного транспорту [52-54].

### 1.3 Роль інформаційних систем та цифрових технологій в міській логістиці

Інформаційна логістика являється з'єднувальною ланкою між виробником, перевізником та споживачем, являє собою систему взаємозалежних методів, способів, програмних забезпечень для зчитування, обробки, зберігання та передачі інформації на відповідний ієрархічний рівень для прийняття управлінських рішень що до переміщення матеріального потоку [55, 56]. Основні завдання інформаційної логістики [56-58]:

- організація та управління процесом доставки вантажів, надання якісних послуг споживачам, зменшення ризиків при перевезенні вантажів;
- аналіз діяльності транспортної компанії, скорочення витрат за рахунок раціональних рішень при обміну та обробки інформації;
- заключення договорів на доставку вантажів;
- швидке реагування та прийняття відповідних рішень на зміни при доставці вантажів, що дозволяє скоротити витрати;

– збільшення рівня конкурентоспроможності компанії на ринку транспортних послуг, залучення нових клієнтів, збільшення фінансового результату.

До основних принципів інформаційної логістики відносять [55]:

- комплексність (систематизація дій всіх учасників процесу при плануванні, управлінні та координації інформаційного потоку);
- інноваційність (використання підприємством новітніх технологій та програмних продуктів для обміну, зберігання та аналізу);
- точність (обмін тільки необхідною, перевіреною і актуальною інформацією);
- стабільність (ефективність роботи систем інформаційного обміну та своєчасність надходження інформації);
- варіативність (можливість змінювати, доповнювати об'єм інформації).

Інформаційну систему міської логістики (ІСМЛ) доцільно трактувати як сукупність інтегрованих інформаційних процесів, що базуються на застосуванні сучасних ІТ-рішень, засобів телематики та телекомунікаційних технологій. У поєднанні з уніфікованими процедурами та стандартами, така система забезпечує ефективне планування, організацію, координацію та моніторинг пасажиро- та вантажопотоків у межах міської агломерації. Функціонально ІСМЛ виступає як спеціалізована система підтримки прийняття рішень, спрямована на оптимізацію логістичного управління.

Доступ до актуальної та нагальної інформації є основою для ефективного планування та координації потоків людей і товарів у місті. Використання сучасних інформаційних технологій у взаємовідносинах між зацікавленими сторонами міської логістики може дозволити швидше отримувати інформацію [59]. Дані можна збирати з внутрішніх і зовнішніх джерел, які можуть бути первинними або вторинними даними. До внутрішніх джерел належать звіти, аналізи надані департаментами та установами муніципальної влади. Зовнішні дані надходять від зацікавлених сторін міської

логістики та інших установ та організацій, які будуть опосередковано впливати на рух людей і товарів у місті. На рисунку 1.7 представлена спрощена схема інформаційного обміну даними між транспортними компаніями, клієнтами та місцевою владою щодо транспортного процесу перевезення вантажів у місті.

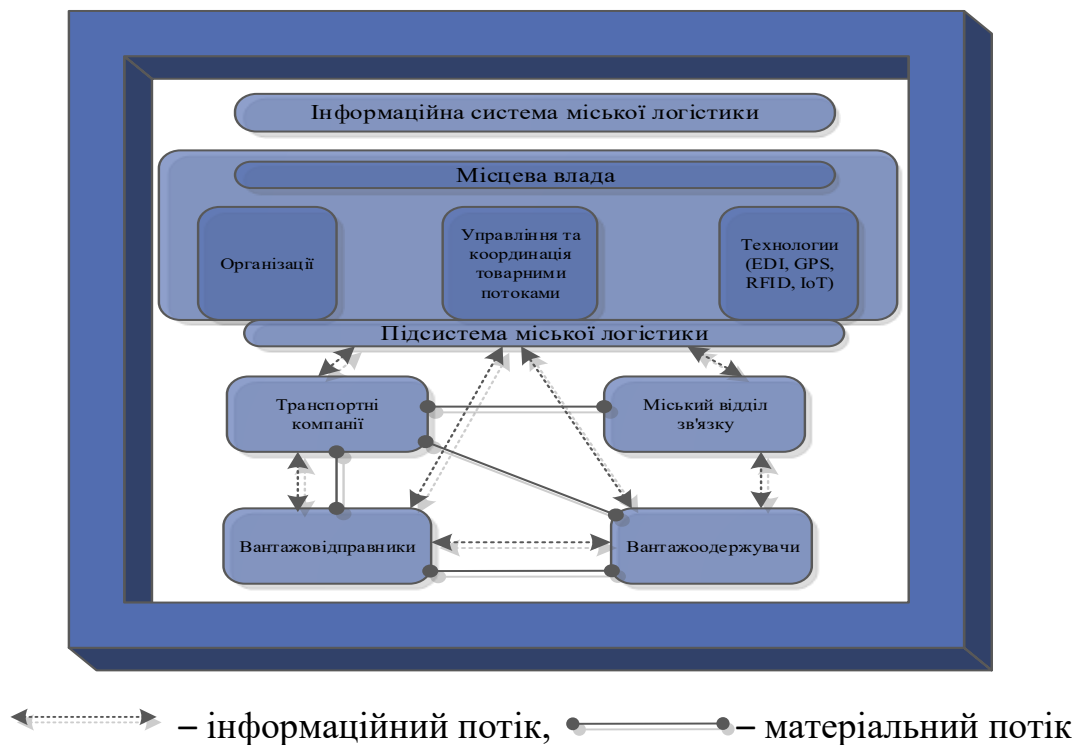


Рисунок 1.7 – Схема інформаційного обміну

В дослідженні [60] розроблено модель децентралізованого співробітництва та обміном інформацією між зацікавленими сторонами при міських вантажних перевезеннях, модель оперативно реагує на зміни в зовнішньому середовищі в ланцюзі постачання. Перевагою даної моделі є те що автори при розробці маршрутизації логістичних операцій врахували можливі зміни в замовленні доставки вантажу клієнтам – відміна замовлення або зміна об'єму замовлення, зміна часу доставки вантажу в порівнянні від попереднього замовлення, можливість відстежування вантажу та які логістичні операції з ним відбуваються. Модель була застосована на практиці в місті Медельїн в Колумбії, реагування моделі на зміни в процесі перевезення

вантажів становить 68% від всіх замовлень за день, недоліком роботи є те що автори не проаналізували як зміняться витрати на доставку в залежності від побажань клієнтів.

Сватко В.В. в дисертаційній роботі [61] розробив інформаційну систему яка врахує нестаціонарну динаміку транспортних потоків для покращення прийняття управлінських рішень при організації вантажних перевезень в великих містах, система складається з 4 підсистем (вхідні дані, зберігання та обробка інформації, доступ до баз, аналіз та звітність), автор на базі даних існуючих маршрутів підприємства ТОВ «Фрозен Фрут» яка здійснює дрібнопартійні перевезення в місті Київ виявив що використання запропонованої ним системи оптимізує маршрути та надає можливість підприємству знизити витрати на доставку товарів на 50%.

В Україні за останні п'ять років через всесвітню пандемію та введення воєнного стану різко скоротились офлайн-продажі та зросла активність електронної комерції, через що збільшились вантажні перевезення в міських умовах, транспортні компанії несуть більші витрати у зв'язку з масштабуванням своїх операцій, для підвищення ефективності своєї діяльності необхідно запроваджувати новітні інновації на логістичних підходах. Діджиталізація та цифрові технології активно проникають в організацію міських перевезень та в логістику міста [62], використання новітніх технологій оснований на IoT (інтернет речей) значно скорочують час та витрати транспортним компаніям [63], впливають на конкуренцію на транспортному ринку [64], є основою прийняття управлінських рішень в короткий термін [65], та покращують якість надання транспортних послуг споживачам [64] (рис. 1.8). В логістиці IoT являється виробничою технологією, яка направлена не лише на покращення діяльності транспортної компанії а й на клієнтоорієнтованість [66].

IoT це мережа яка поєднує між собою матеріальні пристрої, програмні продукти, що забезпечують обмін інформацією між комп'ютерними системами та матеріальним світом завдяки протоколам зв'язку [67], це надає

прозорість логістичним поставкам. Компанії які використовують новітні концепції швидко займають вище місце серед інших які не впроваджують новітні технології. За допомогою даної технології в режимі прямої трансляції можливо моніторити місце знаходження вантажу, стан та ефективність роботи транспортного засобу, температурні показники та вологість в кузові авто що дуже важливо для перевезення швидкопсувних вантажів, контролювати робочий процес водія [64].

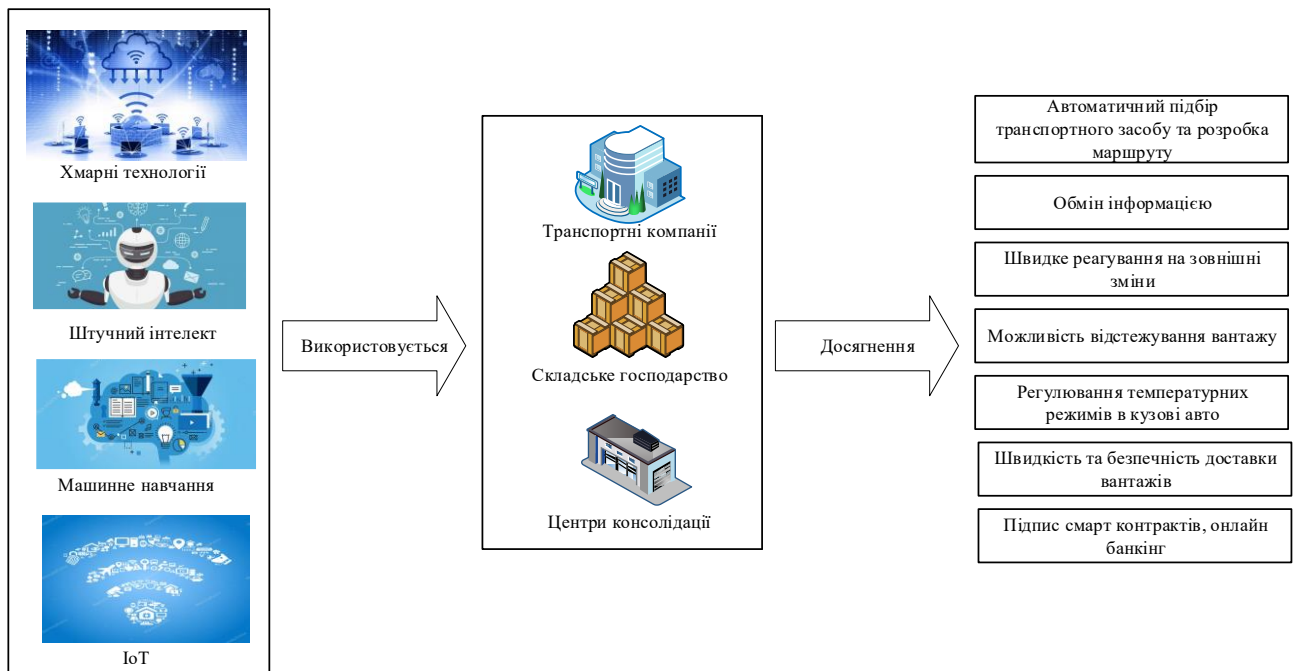


Рисунок 1.8 – Вплив цифрових технологій на досягнення цілей логістичних компаній

При організації міських перевезень для відстежування місця знаходження вантажа та ідентифікації вантажів при навантаженні-розвантаженні використовують RFID мітки, вони збирають та передають інформацію через технології ІоТ та блокчейн на комп'ютер диспетчера, ці дані використовуються для оптимізації маршрутів. RFID мітка містить інформацію про вантаж, місце та час доставки, транспортну компанію, перевагою даного ідентифікатора є можливість повторного використання, та виключає помилку людського фактору [67, 69].

Також для відстежування за якістю перевезення вантажу використовують систему WSN, за допомогою датчиків розташованих в авто зчитується інформація з навколишнього середовища та всередині авто для врегулювання температурних показників при перевезенні швидкопсувних вантажів, ця технологія використовується разом с RFID, 4G, QR-коди, YMS, ERP, GPS, завдяки цим технологіям підвищується ефективність доставки вантажів, швидкість обміну інформацією, можливість вантажоодержувачам відслідковувати місце знаходження товару та транспортні операції, ефективність використання парку, скорочуються неефективні простой транспортних засобів, час та вартість доставки [63, 67-71].

Впровадження в процес організації міських перевезень IoT знижує кількість помилок людського фактору, покращує якість надання послуг клієнтам, автоматизує більшість логістичних операцій, знижує витрати на доставку, підвищує рівень іміджу компанії, на основі цієї технології розробляються і впроваджуються наступні системи покращення процесу перевезення вантажів в місті (табл. 1.2).

Таблиця 1.2 – Основна характеристика технологій на основі IoT [72-78]

Назва технології	Основна мета
Cloud Computing	Хмарні технології в логістиці надають доступ до інформації в будь який момент часу, можливість редагувати інформацію, перехід від паперової документації на цифрову, зменшення фінансових витрат на обробку інформації та можливість брати в оренду і використовувати програмні продукти, не потребують резерву даних на інших платформах, точність інформації впливає на ефективність прийняття управлінських рішень

## Продовження таблиці 1.2

Назва технології	Основна мета
Blockchain	Використання даної технології в міських перевезеннях спрощує процес транзакцій між учасниками, можливість заміни диспетчера, розробка маршруту та відслідковування вантажу на всьому ланцюзі доставки, підтвердження доставки, формування рахунків, зменшення витрат на оплату праці працівникам, перевагою даної технології є безпека зберігання даних на серверу (неможливість видалити дані безслідно)
Big Data	Використовується для аналізу великого об'єму інформації, зменшує час на прийняття управлінського рішення, в логістиці пришвидшує досягнення основної мети доставити товар в відповідному об'ємі в конкретне місце за мінімальний час та витрати
Штучний інтелект	Об'єднання штучного інтелекту разом з Cloud Computing та Big Data підвищує ефективність прийняття управлінського рішення на оперативному рівні, в загальні дана технологія може використовуватися на всьому процесі організації та управління процесом перевезення
Машинне навчання	Використовуючи відповідний об'єм алгоритмів та аналіз великої кількості інформації формується машина яка розвивається, враховує помилки та вчиться на них, в логістиці машинне навчання пришвидшує процес планування, організації та контролю за доставкою вантажу, це дозволяє пришвидшити обробку заявки на перевезення, ефективно використовувати автопарк

Але є і недоліки використання IoT систем при організації міських вантажних перевезень на засадах логістики – немає об'єктивної законодавчої

бази для вирішення суперечливих питань у використанні цифрових технологій, несумісність систем які використовують зацікавлені сторони або взагалі відсутність інноваційних технологій в компаніях, відсутність єдиної інтеграційної системи, значні капіталовкладення для придбання та реалізацію інформаційних систем, можливість хакерських атак на бази даних та викрадення інформації, нефункціональність технологій в режимі офлайн.

На даний момент інновації в сфері інформаційної логістики полягають в концепції Smart City. Концепція дає змогу керувати, контролювати і покращувати міську спільноту та інфраструктуру за рахунок впровадження цифрових рішень[79,80]. Логістика міст ґрунтується на зниженні кількості вантажних транспортних засобів на вулицях міста, що дозволить знизити завантаженість, зменшити кількість їздок, поліпшити якість повітря.

Застосування інформаційних технологій в міській логістиці дозволить скоординувати ланцюги постачання продукції в містах, знизити витрати на перевезення за рахунок урахування особливостей функціонування транспортної системи міста. Аналіз програмних продуктів, що використовуються для підвищення ефективності доставки вантажів у містах дозволив виділити найпопулярніші у використанні. В таблиці 1.3 представлена основна концепція найпопулярніших програмних продуктів за допомогою яких пришвидшується процес організації, координації та управління перевезенням вантажів в місті.

Таблиця 1.3 – Характеристика програмних продуктів [81-87]

Програмний продукт	Основна концепція
Ant Logistics	Планування та оптимізація існуючих маршрутів, зниження часу доставки, відстеження вантажу у продовж перевезення, контроль витрат
Smart City Logistics	Платформа відображає інформацію про завантаженість доріг, викид шкідливих речовин

Продовження таблиці 1.3

Roadnet Transportation Suite	Оптимізація маршрутів, планування та оптимізація завантаження авто, дає змогу в режимі реального часу проаналізувати різні показники реального стану організації та запланованої діяльності
TransTrade	Логістична програма дозволяє автоматизувати процеси обробки вхідних заявок і вихідних документів, допомагає скласти оптимальний маршрут перевезення з найкращим набором транспортних засобів
ABM Rinkai TMS	Автоматизація маршрутизації перевезень вантажів та зниження витрат на доставку
Logist.UA	Автоматизація обробки інформації, вхідних заявок, розробка раціонального маршруту, відслідковування пересування вантажу, обмін інформацією завдяки WMS, YMS, ERP
BAS Управління автотранспортом	Програмний продукт спрощує систему управління автопарком, виконує функції диспетчера (зменшення витрат та час обробки інформації, збільшується продуктивність роботи підприємства), заповнення супровідної документації, ведення бухгалтерського обліку
Rational logistics	Розробка маршрутів та підбір транспортних засобів з найменшою собівартістю, аналіз роботи перевізника виділення проблем, можливість складання фінансових звітів

Проведений аналіз демонструє, що ефективна організація міських вантажних перевезень у сучасних умовах нерозривно пов'язана із глибоким впровадженням цифрових технологій та інформаційних систем. Розглянуті

інструменти, від концепції Інтернету речей та блокчейну до конкретних програмних продуктів, таких як «Ant Logistics» та «ABM Rinkai TMS», є ключовими елементами для оптимізації логістичних ланцюгів. Вони дозволяють автоматизувати маршрутизацію, підвищити прозорість поставок, скоротити операційні витрати та мінімізувати вплив людського фактору.

Однак, попри значний потенціал, існують суттєві бар'єри, зокрема висока вартість впровадження, проблеми із сумісністю різних систем та відсутність єдиної законодавчої бази. Подальший розвиток інформаційної логістики в містах України залежатиме від здатності бізнесу та місцевої влади спільно працювати над створенням інтегрованих платформ. Кінцевою метою є формування єдиного цифрового простору в рамках концепції «Smart City», де всі учасники логістичного процесу – перевізники, вантажовідправники, клієнти та муніципальні служби – зможуть ефективно взаємодіяти в режимі реального часу, забезпечуючи сталий та раціональний розвиток міської транспортної інфраструктури.

#### 1.4 Вплив воєнних ризиків на стійкість та функціонування міських логістичних систем

Сучасна парадигма управління ланцюгами постачань переживає фундаментальну трансформацію. Протягом десятиліть домінуючою філософією була оптимізація задля досягнення максимальної ефективності, що втілювалася в концепціях «точно в строк» та ощадливого виробництва. Однак нещодавня послідовність глобальних потрясінь, включно з пандемією COVID-19, торговельними війнами та повномасштабними воєнними конфліктами, викрила крихкість глобалізованих та високоефективних ланцюгів постачань. Це змусило як академічну спільноту, так і практиків переорієнтувати свою увагу з виключної ефективності на забезпечення стійкості та надійності.

У цьому новому, більш фрагментованому та непередбачуваному світі, геополітична нестабільність стала ключовим фактором ризику [88]. Керівники провідних світових компаній визначають геополітичні конфлікти як одну з головних загроз для зростання, що може суттєво обмежити їхню здатність реалізовувати продукцію та послуги. У цьому контексті стійкість ланцюга постачань визначається не просто як здатність швидко відновлюватися після збоїв, а як комплексна адаптивна спроможність системи витримувати зовнішній тиск, поглинати наслідки потрясінь та продовжувати функціонувати в умовах постійної нестабільності [89]. Дослідження все частіше розглядають геополітичні збої як окрему, нову підгалузь у науці про управління ланцюгами постачань, що виходить за межі традиційного аналізу операційних ризиків [88].

Однак, що є більш важливим на концептуальному рівні, змінюється саме розуміння природи «збою». Якщо раніше в літературі з управління ланцюгами постачань збій розглядався переважно як тимчасова, виняткова подія (наприклад, стихійне лихо або пожежа на виробництві), після якої система має «повернутися до норми», то в контексті затяжних воєнних конфліктів ситуація кардинально інша [90]. Війна створює не тимчасовий збій, а нову, перманентну операційну реальність, де високий рівень невизначеності та загрози є не винятком, а постійною, структурною характеристикою середовища. Це підтверджується аналізом умов функціонування логістики в Харкові, де воєнні загрози є щоденним фактором, а не рідкісною подією. Відповідно, стратегічна мета логістичного управління зміщується з відновлення після збою на забезпечення безперервної адаптації та надійного функціонування під постійним тиском. Це вимагає розробки таких моделей та методів, які розглядають ризик не як зовнішній шок, а як ендогенну змінну, що має бути інтегрована в процес прийняття щоденних операційних рішень.

Перехід від загального аналізу геополітичної нестабільності до розробки практичних моделей управління вимагає детальної концептуалізації та класифікації воєнних ризиків, що впливають на логістику в зоні прямого

конфлікту. Воєнні ризики фундаментально відрізняються від комерційних або природних збоїв за кількома ключовими параметрами: вони є результатом цілеспрямованих дій супротивника, часто мають системний, а не локальний характер, і є вкрай динамічними.

Для формування комплексної таксономії загроз доцільно спиратися на напрацювання суміжних наукових напрямів, зокрема гуманітарної та військової логістики, де аналіз ризиків у ворожому середовищі є ключовим елементом досліджень. Так, результати ґрунтовного вивчення гуманітарних операцій у зонах збройних конфліктів Демократичної Республіки Конго та Центральноафриканської Республіки дали змогу виокремити та систематизувати 268 унікальних факторів ризику, згрупованих у вісім узагальнених категорій:

- ризики відповідності – пов’язані з необхідністю дотримання міжнародних стандартів, регуляторних вимог та гуманітарних принципів діяльності;
- операційні ризики – охоплюють повсякденні виклики забезпечення логістичних процесів, зокрема обмеження доступу до цільових територій з боку збройних формувань або перебої з постачанням критичних ресурсів (паливо, продовольство тощо);
- ризики закупівель – характеризуються імовірністю несвоєчасного або неповного забезпечення необхідними матеріальними ресурсами та послугами;
- репутаційні ризики – стосуються сприйняття та оцінки діяльності організації місцевими громадами;
- ризики безпеки – включають загрози фізичній цілісності персоналу, збереженню матеріальних активів і безперебійному функціонуванню логістичних ланцюгів; визначаються як пріоритетні у всіх умовах активних бойових дій;
- ризики охорони праці – пов’язані з небезпекою травмування та іншими чинниками, що впливають на здоров’я і працездатність персоналу;

- кадрові ризики – відображають проблеми залучення, підготовки та утримання кваліфікованих фахівців у зоні конфлікту;
- технічні ризики – зумовлені обмеженнями інфраструктури та технологічного забезпечення, наприклад відсутністю стабільного зв'язку або придатних транспортних засобів.

Ключовою проблемою, що висвітлюється в літературі, є перехід від якісного опису цих загроз до їх кількісної оцінки, яка могла б бути використана в моделях підтримки прийняття рішень [91]. Цей перехід ускладнюється унікальною природою воєнних ризиків, а саме їхнім корельованим та системним характером. Традиційні підходи до управління ризиками в ланцюгах постачань часто базуються на припущенні про незалежність збоїв [92]. Наприклад, пожежа на заводі одного постачальника є локальною подією, наслідки якої можна пом'якшити, переключившись на резервного постачальника. Воєнні ризики діють інакше. Повітряна тривога, яка виникає в Харкові, є системною подією, яка одночасно зупиняє діяльність усіх учасників логістичного процесу (постачальників, перевізників, клієнтів) у межах певного географічного регіону. Ракетний удар по ключовому мосту є не просто відмовою однієї ланки мережі; це топологічна зміна всього транспортного графу, що спричиняє каскадні ефекти у вигляді заторів на об'їзних шляхах та порушення планів для всіх перевізників

### 1.5 Висновок за розділом

Проведений аналіз демонструє, що інтеграція логістики та вантажного транспорту еволюціонувала від операційної задачі до стратегічного імперативу, який визначає економічну стійкість та якість міського життя. Особливої гостроти ця проблема набуває в контексті міської логістики, яка стикається зі зростаючими викликами урбанізації, перевантаженості інфраструктури та вибухового розвитку електронної комерції, що загострює проблему «останньої милі» – найдорожчого та найскладнішого етапу

доставки. Для України ця проблематика ускладнюється безпрецедентними наслідками повномасштабної війни, що призвели до руйнування інфраструктури та докорінної зміни вантажопотоків.

У відповідь на ці виклики теоретичний апарат логістики трансформувався, перейшовши від фрагментованих операцій до комплексного управління ланцюгами постачань, що інтегрує ключові бізнес-процеси – від взаємовідносин зі споживачами до управління поверненнями. Водночас, нагальна потреба у збалансуванні економічної ефективності з екологічною та соціальною відповідальністю зумовила розвиток концепцій сталого розвитку та «зеленої» логістики (екологістики). Ці концепції пропонують стратегічні рамки для вирішення таких питань, як зменшення викидів, оптимізація використання ресурсів та впровадження еко-технологій, зокрема через розвиток центрів консолідації, мікрохабів та використання альтернативних видів транспорту, вантажні трамваї та велосипеди.

Центральною рушійною силою сучасних логістичних систем є цифрова трансформація, що втілюється у концепції «Логістика 4.0». Інформаційна логістика виступає з'єднувальною ланкою між усіма учасниками процесу, забезпечуючи збір, обробку та передачу даних для прийняття ефективних управлінських рішень. Впровадження таких технологій, як Інтернет речей (IoT), штучний інтелект, машинне навчання, Blockchain та Big Data, дозволяє автоматизувати процеси, оптимізувати маршрути, відстежувати вантажі в реальному часі та підвищувати прозорість усього ланцюга постачань. Практична реалізація цих технологій знаходить своє відображення у численних програмних продуктах, призначених для автоматизації логістичної діяльності. Попри значний технологічний потенціал, успішне впровадження інновацій стикається із суттєвими бар'єрами: високими капіталовкладеннями, відсутністю єдиної законодавчої бази та інтеграційних стандартів, проблемами сумісності систем та ризиками кібератак. Таким чином, майбутнє міської логістики залежить від комплексного підходу.

Воєнні ризики фундаментально змінюють парадигму управління, зміщуючи акцент з максимальної ефективності на стійкість та надійність. Війна створює не тимчасовий збій, а нову перманентну операційну реальність, де загрози є постійною характеристикою середовища. Це вимагає розробки моделей, які інтегрують системні воєнні ризики в щоденні операційні рішення, забезпечуючи безперервну адаптацію та функціонування під постійним тиском. Таким чином, майбутнє міської логістики, особливо в умовах геополітичної нестабільності, залежить від здатності до багатосторонньої співпраці та побудови цілісної системи, що охоплює економічні, екологічні, соціальні та безпекові аспекти.

## РОЗДІЛ 2

# ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ ВИБОРУ МЕТОДУ ОРГАНІЗАЦІЇ МІСЬКИХ АВТОМОБІЛЬНИХ ПЕРЕВЕЗЕНЬ

### 2.1 Міська вантажна логістика як складна адаптивна система

Процес організації міських автомобільних перевезень, що є кровоносною системою сучасної урбаністичної економіки, традиційно аналізувався через призму окремих операційних завдань: оптимізації маршрутів, управління автопарком чи мінімізації витрат на доставку. Проте такий фрагментарний підхід не дозволяє досягнути всю складність, динамічність та взаємозалежність процесів, що відбуваються в обмеженому та висококонкурентному міському просторі. Зростання обсягів електронної комерції, посилення екологічних вимог та загострення проблеми заторів вимагають переходу до більш цілісного, інтегрованого бачення.

Системний підхід є фундаментом сучасної логістики, він дозволяє розглядати логістичні елементи не просто як окремі компоненти, а як взаємопов'язану систему. Така цілісність породжує нові, синергетичні властивості, які не притаманні окремим частинам. В контексті логістики цей підхід вимагає обов'язкового аналізу всіх складових системи – від закупівлі сировини до доставки готової продукції – та взаємозв'язків між ними, де всі взаємовідносини спрямовані на досягнення загальної мети з мінімальними витратами. Логістична система за своєю суттю є відкритою, маючи розвинені зв'язки із зовнішнім середовищем, що дозволяє їй адаптуватися до змін. Загальноприйняте визначення логістичної системи як «адаптивної системи зі зворотним зв'язком, яка виконує ті або інші логістичні функції» прямо вказує на її динамічний та кібернетичний характер.

Перенесення цього підходу на міські вантажні перевезення є не просто доцільним, а необхідним. Міське середовище є вкрай складним, динамічним та непередбачуваним. Воно характеризується високою щільністю населення,

інтенсивним рухом, конкуренцією за обмежений простір та наявністю великої кількості зацікавлених сторін. У таких умовах лінійні, детерміновані моделі управління виявляються неефективними. Саме тому для адекватного опису та аналізу UFT необхідно застосовувати більш просунуту концепцію – теорію складних адаптивних систем (Complex Adaptive Systems, CAS).

Система міських вантажних перевезень не є простим механізмом, який можна централізовано спроектувати та оптимізувати. Натомість вона функціонує як живий організм, що постійно еволюціонує у відповідь на внутрішні та зовнішні стимули. Вона демонструє всі ключові властивості, притаманні складним адаптивним системам (рис. 2.1).

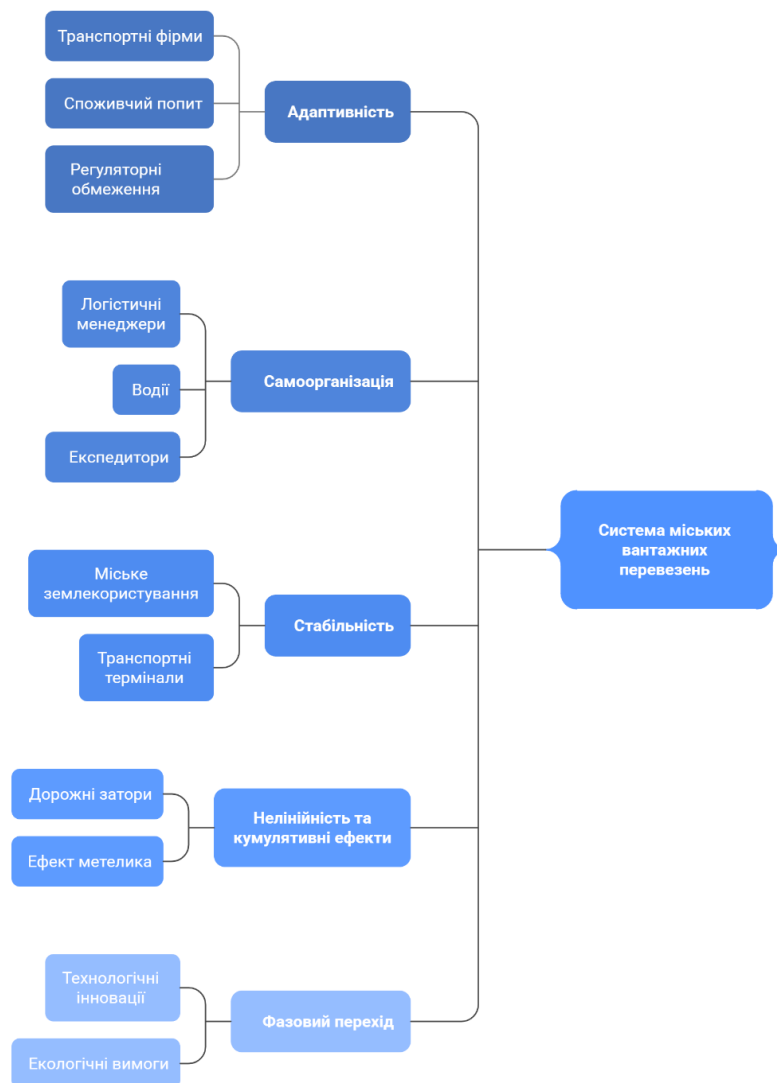


Рисунок 2.1 – Ключові властивості та фактори впливу на систему міських вантажних перевезень

Адаптивність це фундаментальна властивість системи, що проявляється на всіх рівнях. Транспортні фірми постійно адаптують свої стратегії, маршрути та тарифи у відповідь на дії конкурентів, зміни споживчого попиту (наприклад, сплеск онлайн-замовлень) та нові регуляторні обмеження, що вводяться міською владою. Інвестиції в нову інфраструктуру, такі як будівництво міських консолідаційних центрів, також є стратегією адаптації до зростаючих обсягів вантажів та екологічних вимог.

Самоорганізація, у системі UFT відсутній єдиний центр управління, який би диктував кожному водієві його маршрут. Натомість загальна структура вантажопотоків виникає як емерджентний результат децентралізованих рішень тисяч окремих агентів (логістичних менеджерів, водіїв, експедиторів). Кожен з них, діючи на основі локальної інформації (затори на конкретній вулиці, часові вікна для доставки, власні цілі щодо економії палива), робить вибір, який у сукупності з виборами інших агентів формує глобальну картину руху в місті. Управління ланцюгами поставок, де компанії динамічно змінюють постачальників та канали дистрибуції, є ще одним яскравим прикладом самоорганізації.

Стабільність, попри постійну динаміку, система має стабільні компоненти, що створюють довготривалий каркас для її функціонування. Це, перш за все, міське землекористування (розташування промислових зон, торгових центрів, житлових масивів) та розміщення великих транспортних терміналів (портів, залізничних вузлів, аеропортів). Ці елементи змінюються дуже повільно, протягом десятиліть, і визначають основні вектори та «гравітаційні центри» для вантажних потоків.

Нелінійність та кумулятивні ефекти, взаємозв'язки в системі UFT рідко бувають лінійними. Класичним прикладом є дорожні затори: кожна додаткова одиниця транспорту, що перевищує пропускну здатність дороги, призводить до експоненційного, а не лінійного, зростання затримок для всіх учасників руху. Подібним чином, відносно незначна подія, така як дорожньо-транспортна пригода на ключовому мосту або раптове перекриття вулиці,

може спричинити непропорційно великий колапс у всій транспортній мережі міста, демонструючи «ефект метелика».

Фазовий перехід, система може зазнавати різких, кардинальних змін у відповідь на певні події. Історично, технологічні інновації, такі як контейнеризація, спричинили справжній фазовий перехід, створивши абсолютно нові моделі перевезень, типи терміналів та структуру потоків. Сьогодні факторами, що можуть спровокувати подібний перехід, є посилення вимог до скорочення викидів вуглецю, розвиток автономного транспорту та дрони, які потенційно можуть докорінно змінити ландшафт міської логістики.

Управління міською логістикою, що розглядається як складна адаптивна система, вимагає переходу від жорсткого, централізованого планування до парадигми гнучкого управління. Замість спроб розробки єдиного статичного «оптимального плану», що є неефективним для такої динамічної системи, акцент зміщується на створення умов для самоорганізації її учасників. Такий підхід передбачає, що замість прямого контролю міська влада виконує роль агента, що створює сприятливе середовище. Це досягається шляхом розробки правил, впровадження інфраструктурних рішень та інформаційних платформ, що стимулюють виникнення та поширення ефективних і стійких логістичних рішень на локальному рівні. Отже, фокус управління переноситься з мікроменеджменту на системну регуляцію, що дозволяє досягти бажаних результатів через непрямий вплив.

На найглибшому, академічному рівні аналізу, система міських вантажних перевезень визначається не просто як сукупність функцій, а як «глибоко вбудована, постійно проблематична соціотехнічна підсистема міського середовища». Її визначальною характеристикою є безперервний, часто невирішений конфлікт між невинним економічним імперативом ефективної та швидкої доставки товарів та конкуруючими вимогами до міського простору, якості навколишнього середовища, громадського здоров'я та соціальної справедливості.

Цей фундаментальний конфлікт є рушійною силою, що визначає динаміку та еволюцію системи. Він виникає через системну проблему екстерналізації витрат, логістичні оператори та їхні клієнти отримують економічну вигоду від швидкої та дешевої доставки, тоді як суспільство в цілому несе пов'язані з цим витрати – забруднення повітря, шумове забруднення, ризики для безпеки пішоходів та велосипедистів, втрата громадського простору через затори та паркування вантажівок. Ці витрати не відображені у вартості доставки, що створює ринковий збій і стимулює надмірне використання неефективних з суспільної точки зору логістичних практик.

Цей внутрішній конфлікт не є недоліком системи, який можна просто усунути. Навпаки, саме ця напруга є джерелом постійної адаптації та змін. Перевізники адаптуються до регуляторних обмежень, які є проявом суспільних вимог. Міська влада адаптує інфраструктуру та правила у відповідь на зростаючий тиск з боку логістичного сектору. Споживачі, вимагаючи все швидшої доставки, створюють тиск на перевізників, що змушує їх шукати нові, іноді менш екологічні, рішення. Таким чином, цей постійний процес боротьби інтересів між різними учасниками транспортного процесу є тим самим двигуном, який робить систему динамічною та адаптивною. Будь-яка ефективна політика в галузі міської логістики повинна не ігнорувати цей конфлікт, а визнавати його центральну роль і бути розробленою таким чином, щоб керувати ним, а не намагатися його повністю ліквідувати.

Для розуміння функціонування системи UFT як єдиного цілого необхідно детально проаналізувати її складові елементи. Кожен елемент є автономним учасником транспортного процесу зі своїми власними цілями, функціями та обмеженнями. Їхня взаємодія і породжує складну поведінку всієї системи. Основними елементами системи є вантажовідправники, перевізники, вантажоодержувачі, міська інфраструктура та органи управління. Аналіз цих елементів виявляє фундаментальну властивість системи UFT, різну швидкість адаптації її компонентів (табл. 2.1).

Таблиця 2.1 – Характеристика ключових елементів системи міських вантажних перевезень

Елемент системи	Суб'єкти взаємодії	Основна мета	Ключові обмеження
Вантажовідправники	Виробники, дистриб'ютори, ритейлери, інтернет-магазини	Мінімізація логістичних витрат, забезпечення швидкості та надійності доставки	Бюджет, вимоги клієнтів, характеристики вантажу, доступність перевізників
Перевізники	Логістичні компанії, кур'єрські служби, приватний флот компаній	Максимізація прибутку, оптимізація використання активів (транспорту, персоналу)	Затори, регуляторні обмеження (часові вікна), вартість палива, доступність водіїв, інфраструктурні ліміти
Вантажоодержувачі	Підприємства, роздрібні магазини, ресторани, офіси, будівельні майданчики, кінцеві споживачі	Своєчасне отримання непошкодженого товару, низька вартість або безкоштовна доставка, гнучкість отримання	Час очікування, доступність для прийому вантажу, обмеження щодо зберігання
Міська інфраструктура	Департаменти транспорту, комунальні служби, містобудівні організації	Забезпечення мобільності для всіх учасників руху, підтримка економічної активності міста	Пропускна здатність мережі, фізичні обмеження (ширина вулиць, висота мостів), бюджетні обмеження на розвиток
Органи управління	Муніципалітети, національні та регіональні регулятори, поліція	Збалансування економічного розвитку та суспільного добробуту, забезпечення сталого та безпечного функціонування міста	Політичні цикли, конфлікти інтересів учасників процесу, брак даних для прийняття рішень, правові рамки

Вантажовідправники, перевізники та вантажоодержувачі є високоадаптивними учасниками транспортного процесу, здатними змінювати свої стратегії та поведінку протягом місяців, тижнів або навіть днів у відповідь на ринкові сигнали. На противагу їм, міська інфраструктура є вкрай повільним, інертним учасником, де зміни плануються роками та реалізуються десятиліттями. Органи управління займають проміжне положення, з політичними та бюджетними циклами, що тривають кілька років. Саме цей дисонанс у швидкостях адаптації є одним з головних джерел системних проблем міської логістики. Стрімке зростання попиту на доставку (швидкі учасники) вступає у конфлікт із застарілою вуличною мережею (повільний учасник), а регулятори (учасник із середньою швидкістю) часто не встигають адекватно реагувати на ці виклики, постійно перебуваючи у ролі наздоганяючих.

Елементи системи UFT не існують ізольовано. Вони перебувають у стані безперервної, динамічної взаємодії, яка визначає загальну поведінку системи. Ці взаємозв'язки мають складну природу, поєднуючи в собі як конфлікти інтересів, так і потенціал для синергетичної співпраці (табл. 2.2).

Фізичною основою, на якій розгортається взаємодія всіх елементів, є матеріальні потоки. Їхня структура та характеристики визначають тип транспортних засобів, інтенсивність руху та зони найбільшого навантаження на інфраструктуру. Аналітично доцільно розділити всі міські вантажні потоки на дві великі, принципово відмінні категорії (рис. 2.2). Перша категорія це потоки пов'язані зі споживанням, вони переважно обслуговуються легкими та середніми комерційними автомобілями (фургони, малотоннажні вантажівки). Вони характеризуються великою кількістю зупинок, низьким коефіцієнтом завантаження та значним внеском у затори, особливо на етапі «останньої милі». Друга категорія це потоки пов'язані з виробництвом, як правило, обслуговуються великогабаритним транспортом (самоскиди, тягачі з напівпричепами), що створює значне навантаження на дорожню інфраструктуру та є джерелом шуму та забруднення.

Таблиця 2.2 – Матриця конфліктів та синергії інтересів учасників транспортного процесу

	Перевізники	Органи управління	Вантажоодержувачі	Мешканці міста
Вантажовідправники	Конфлікт: вимога низьких тарифів vs. прагнення перевізника до прибутковості Синергія: довгострокові контракти забезпечують стабільність для обох сторін; обмін даними для кращого планування	Конфлікт: прагнення до мінімізації витрат може суперечити екологічним нормам влади Синергія: участь у «зелених» логістичних схемах, що фінансуються владою, покращує імідж та може дати економічні переваги	Конфлікт: вимоги одержувача до вузьких часових вікон ускладнюють логістику узгодження графіків використання доставок для ритейлерів Синергія: гнучких доставки, нічних доставок для великих ритейлерів	Конфлікт: непрямий, через діяльність перевізників Синергія: вибір екологічних перевізників або моделей доставки може позиціонуватися як соціальна відповідальність бізнесу
Перевізники	–	Конфлікт: обмеження доступу (зона низьких викидів, часові вікна) vs. потреба в ефективності Синергія: влада створює виділені смуги/зони для вантажівок; перевізники надають анонімні дані для кращого транспортного планування	Конфлікт: неможливість доставити товар через відсутність одержувача на місці Синергія: автоматизовані системи сповіщення про час прибуття, використання поштоматів	Конфлікт: шум, забруднення, блокування проїзду/тротуарів Синергія: використання тихого та екологічного транспорту (електромобілі, вантажні велосипеди) зменшує негативний вплив і покращує суспільне сприйняття

Продовження таблиці 2.2

	Перевізники	Органи управління	Вантажоодержувачі	Мешканці міста
Органи управління	–	–	Конфлікт: заохочення владою консолідованих доставок може суперечити бажанню одержувача отримати товар негайно. Синергія: спільне створення мережі поштоматів та пунктів видачі, що зручно для одержувачів і вигідно для міста	Конфлікт: будівництво нової транспортної інфраструктури (напр., об'їзної дороги) може негативно вплинути на мешканців прилеглих районів Синергія: покращення якості громадського простору та безпеки дорожнього руху за рахунок ефективного управління вантажними потоками
Вантажоодержувачі	–	–	–	Конфлікт: бажання отримувати доставку 24/7 створює трафік та шум у житлових зонах Синергія: використання поштоматів або пунктів видачі за межами житлових будинків задовольняє потребу в гнучкості та зменшує незручності для мешканців

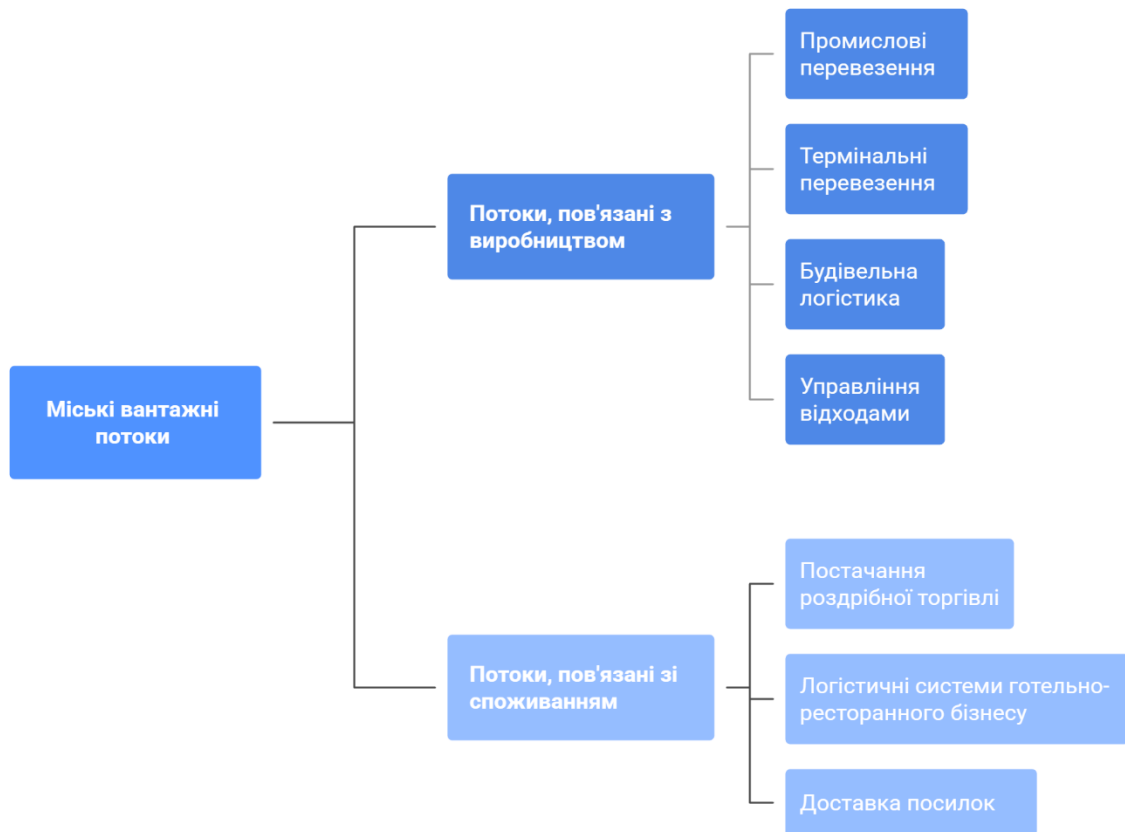


Рисунок 2.2 – Структура міських вантажних потоків

Якщо матеріальні потоки є фізичною основою міської логістики, то інформаційні потоки є її інтеграційним та координуючим механізмом. Вони виконують функцію системи управління, що забезпечує узгоджену взаємодію всіх компонентів – від замовлення до кінцевої доставки. Без ефективного обміну даними, що відбувається в режимі реального часу, система UFT перетворюється на некеровану хаотичну мережу, що призводить до зростання витрат, зниження надійності та посилення негативних наслідків. Інформаційні потоки є ключовим чинником, що дозволяє системі адаптуватися до динамічних змін і забезпечувати її функціональну стійкість.

Сучасна доставка, особливо в сегменті «бізнес-споживач», характеризується як інформаційно-інтенсивний процес. Його архітектура є складною послідовністю взаємопов'язаних інформаційних транзакцій, що синхронізуються з фізичним рухом товару (рис. 2.3). Ця архітектура може бути декомпонована на наступні етапи:

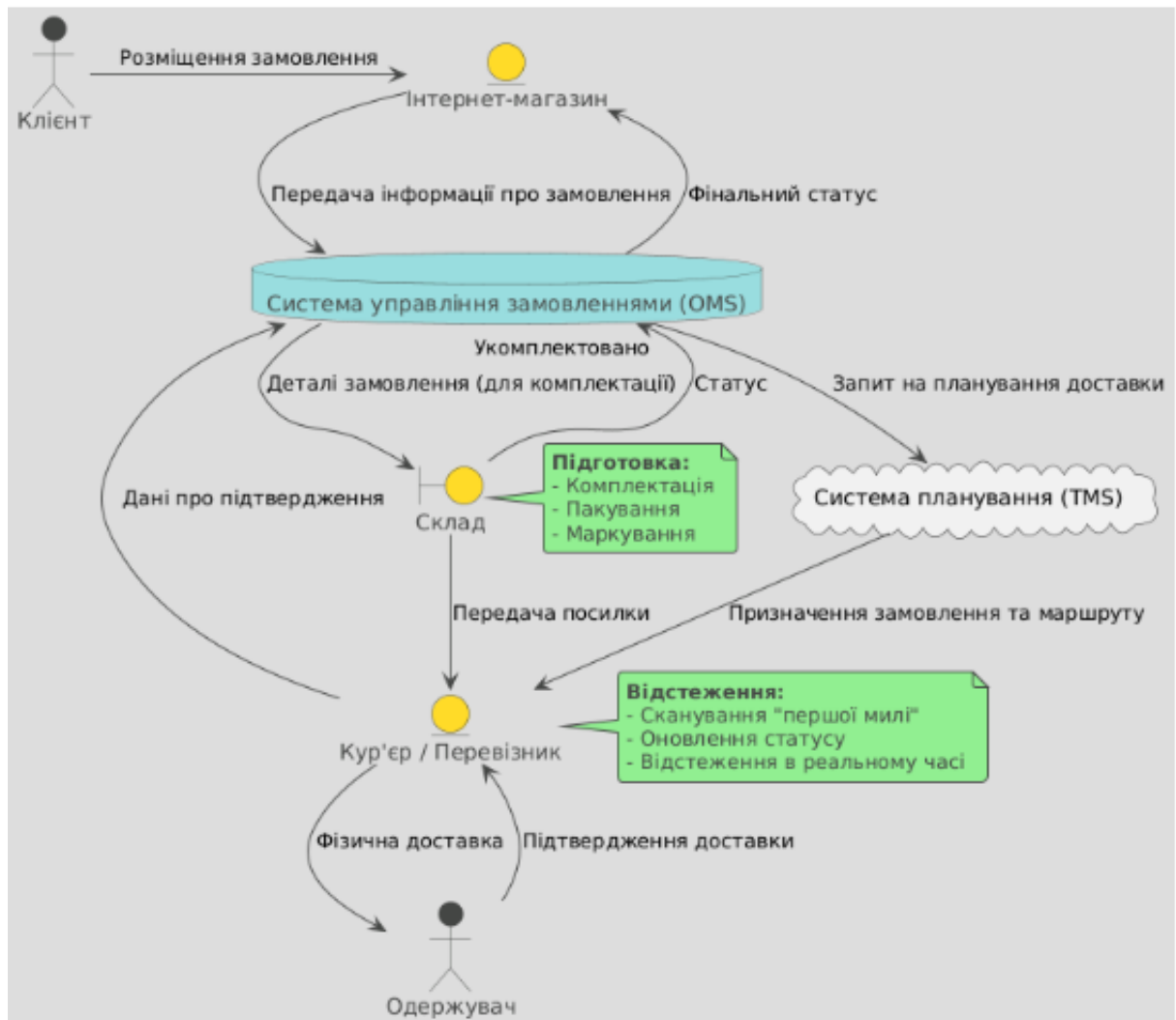


Рисунок 2.3 – Архітектура інформаційних потоків у ланцюгу доставки

1. отримання замовлення – процес починається з цифрового сигналу – розміщення замовлення клієнтом в інтернет-магазині. Ця інформація надходить до централізованої системи управління замовленнями;
2. управління складськими операціями – дані про замовлення передаються на склад, де відбувається комплектація, пакування та ідентифікація товару за допомогою унікальних маркувальних засобів (наприклад, штрих-кодів або QR-кодів);
3. планування та призначення – інформація зі складу надходить до системи управління транспортом, яка, використовуючи алгоритми оптимізації, призначає конкретне замовлення певному кур'єру або транспортному засобу, враховуючи маршрутні обмеження та завантаженість;

4. етапи відстеження – процес відстеження починається з моменту передачі посилки перевізнику («перша миля»), що фіксується скануванням і робить статус доступним для моніторингу. Під час транзиту та сортування кожне сканування оновлює статус у системі;

5. доставка «останньої милі» – після завантаження в транспорт для фінальної доставки, статус посилки оновлюється в реальному часі;

6. підтвердження доставки – завершальним інформаційним актом є цифрове підтвердження доставки (електронний підпис або фотофіксація), що слугує тригером для фіналізації замовлення та запуску фінансових транзакцій.

Таким чином, сучасна доставка – це не просто ланцюжок подій, а нейронна мережа, де кожен фізичний рух супроводжується, контролюється і навіть прогнозується багатовимірними інформаційними потоками, перетворюючи логістику на високотехнологічну, керовану даними галузь.

## 2.2 Критерії ефективності та оцінка логістичних процесів в умовах воєнних ризиків

Ключові показники ефективності (КПІ) в логістиці є кількісними вимірами, що використовуються для оцінки продуктивності, виявлення вузьких місць та стимулювання стратегічних удосконалень. Їхня основна мета – перетворити складні операційні дані на дієві висновки, які дозволяють менеджерам приймати обґрунтовані рішення. Важливість КПІ полягає в їхній здатності узгоджувати щоденні операції із загальними бізнес-цілями, такими як скорочення витрат, підвищення задоволеності клієнтів та операційна досконалість.

Економічні показники є основою для будь-якої комерційної діяльності, відображаючи фінансову ефективність та рентабельність логістичних операцій. Однією з головних метрик є вартість перевезення за одиницю, що розраховується шляхом ділення загальних витрат на автомобільне транспортування на кількість відвантажених одиниць за певний період.

Ще одним критично важливим показником є коефіцієнт використання вантажопідйомності або ступінь заповнення транспортного засобу. Він вимірює відсоток фактично використаної ваги або об'єму автомобіля. Низький коефіцієнт заповнення свідчить про неефективну дистрибуцію і є основною причиною «порожніх пробігів», що спричиняє значні фінансові втрати. Також важливим є контроль витрат на паливо, оскільки вони становлять значну частину операційних витрат. Системи моніторингу транспорту дозволяють аналізувати поточний залишок палива, його витрату, а також час та місце заправок, що безпосередньо впливає на економічну ефективність.

Низький коефіцієнт заповнення та «порожні пробіги» є наслідком не лише неефективного планування, а й фундаментальних викликів, притаманних логістиці «останньої милі». До них належать висока щільність міського трафіку та розсіяність клієнтів, що ускладнює повне завантаження транспортного засобу. Це створює постійний конфлікт між бажаною економічною ефективністю та складною операційною реальністю. Традиційні моделі оптимізації логістичного землекористування, які враховують щільність дорожньої мережі та розміщення об'єктів, спрямовані на вирішення цієї проблеми. Однак, навіть з їхньою допомогою, досягти ідеального завантаження в міських умовах складно, що робить економічні показники постійним викликом, навіть без урахування додаткових факторів.

Операційні показники відображають швидкість, надійність та безперервність логістичних процесів. Одним із найважливіших є своєчасна доставка, що вимірює відсоток замовлень, доставлених клієнту в узгоджене або обіцяне часове вікно. Цей показник є ключовим для логістики «останньої милі», оскільки він безпосередньо впливає на задоволеність клієнтів та репутацію компанії.

Показники «останньої милі», такі як своєчасність, є надзвичайно важливими для споживчої логістики, оскільки вони безпосередньо формують досвід клієнта. Висока вартість та часові затримки на цьому етапі роблять його найскладнішою, але й найважливішою частиною всього логістичного

ланцюга. Взаємозв'язок між своєчасністю та економічними показниками часто є конфліктним. Для забезпечення швидкої доставки компанія може використовувати менш заповнені автомобілі або більш дорогі маршрути, що підвищує вартість за одиницю. Це фундаментальна проблема управління, яка посилюється в умовах хаосу, спричиненого воєнними діями.

Воєнні ризики для цивільної логістики виходять за рамки простого руйнування інфраструктури. Це складний, багат шаровий комплекс загроз, який вимагає систематичного підходу до аналізу. Їх можна класифікувати на кілька категорій (рис. 2.4).



Рисунок 2.4 – Воєнні ризики в логістиці

Виміряти ризик, який є за своєю природою непередбачуваним, є складним завданням, що вимагає використання багатофакторного підходу.

Для оцінки воєнних ризиків у логістиці можна використовувати наступні метрики та індикатори:

- індекс стійкості маршруту – композитний показник, що базується на кількості доступних альтернативних маршрутів, часі, необхідному для відновлення руху після пошкодження інфраструктури, та рівні загроз на маршруті;

- коефіцієнт безпеки – розраховується на основі даних про кількість інцидентів (обстріли, вибухи) на певних маршрутах, використовуючи відкриті джерела та внутрішню аналітику компанії;

- індекс втрат активів – показник, що відстежує відсоток втрачених або пошкоджених транспортних засобів та вантажів за звітний період.

Додавання воєнних ризиків до системи оцінки перетворює традиційні конфлікти між ключовими показниками ефективності у стратегічні дилеми:

- конфлікт «ефективність проти безпеки», у мирний час оптимізація маршруту спрямована на мінімізацію часу та витрат. Однак, в умовах війни, найкоротший або найдешевший шлях може пролягати через небезпечні райони, що підвищує ризик втрати вантажу чи транспорту. Це формує необхідність пріоритизації безпечніших, але довших та дорожчих маршрутів, що призводить до збільшення часу доставки та фінансових витрат. Таким чином, управлінські рішення зміщуються від класичних критеріїв економічної оптимальності до критеріїв ризик-орієнтованої безпеки;

- конфлікт «своєчасність проти резервування», за умов стабільного функціонування ринку стратегія «just-in-time» дозволяє знижувати витрати на зберігання та обслуговування товарних запасів. В умовах війни така стратегія стає вразливою через затримки постачань, руйнування транспортної інфраструктури чи блокування окремих маршрутів. Тому підвищення стійкості логістичної системи вимагає формування резервних запасів, створення додаткових складських потужностей та розробки альтернативних маршрутів. Це забезпечує надійність і безперервність поставок, але суттєво збільшує операційні витрати та впливає на оборотний капітал.

## 2.3 Розробка математичної моделі маршрутизації транспортних засобів з воєнними ризиками

Міська вантажна логістика є життєво важливою артерією, що забезпечує економічне та соціальне функціонування будь-якого сучасного міста. Вона підтримує ланцюги постачання, забезпечує доступність товарів для споживачів та сировини для підприємств. У звичайних умовах оптимізація цих процесів спрямована на підвищення ефективності та зниження витрат. Однак в умовах воєнного конфлікту, як у місті Харків, роль логістики трансформується з комерційної в стратегічну. Надійна та своєчасна доставка товарів першої необхідності – продуктів харчування, медикаментів, палива, будівельних матеріалів – стає фундаментальною умовою для виживання населення, підтримки обороноздатності та забезпечення загальної стійкості міської інфраструктури. Таким чином, задача оптимізації перевезень набуває нового виміру, де головним критерієм стає не лише економічна доцільність, а й здатність системи функціонувати під тиском екстремальних зовнішніх загроз.

Організатори логістики в Харкові стикаються з унікальною проблемою, яку можна охарактеризувати як «комбінована невизначеність». Ця невизначеність складається з двох фундаментально різних, але взаємопов'язаних шарів.

Перший шар – комерційна невизначеність – є класичним для логістики і пов'язаний зі стохастичним попитом клієнтів. Це добре вивчена проблема, в якій точний обсяг замовлення може бути невідомий до моменту прибуття транспортного засобу або незадовго до його відправлення.

Другий шар – безпекова невизначеність – породжений безпосередньо воєнними діями. Він включає непередбачувані збої, що кардинально відрізняються від звичайних операційних ризиків. До них належать – повітряні тривоги, які зупиняють роботу підприємств та транспорту в місті на невизначений час, ракетні удари або атаки безпілотників, які можуть

призвести до фізичного перекриття вулиць та руйнування ділянок дорожньої мережі, вимагаючи негайної зміни маршруту.

Традиційні моделі стохастичної маршрутизації транспортних засобів, хоч і ефективно враховують невизначеність попиту, є недостатніми для Харківських реалій. Вони не мають вбудованих механізмів для кількісної оцінки та інтеграції унікальних воєнних ризиків, які є домінуючим фактором у прийнятті рішень.

Основною метою даного розділу є розробка нової математичної моделі, яку можливо визначити як «задача маршрутизації для гетерогенного парку транспортних засобів з обмеженою вантажністю та воєнними ризиками».

Наукова новизна цієї моделі полягає у формальній інтеграції багатокомпонентного показника «воєнний ризик» у класичну модель маршрутизації. Цей показник параметризується на основі реальних статистичних даних з Харкова, або іншого міста України, що дозволяє перейти від загального моделювання «збоїв» до контекстно-специфічного інструменту оцінки ризиків, адаптованого до умов ведення логістичної діяльності у зоні бойових дій.

Класична задача маршрутизації транспорту є однією з фундаментальних задач комбінаторної оптимізації в галузі дослідження операцій. Її суть полягає у знаходженні оптимального набору маршрутів для парку транспортних засобів, що обслуговують множину клієнтів з одного чи кількох пунктів навантаження, з метою мінімізації сумарних витрат (зазвичай, пройденої відстані або часу). Така задача належить до класу NP-складних задач, що означає експоненційне зростання обчислювальної складності зі збільшенням кількості клієнтів. Це робить неможливим знаходження точного оптимального розв'язку для великомасштабних практичних задач за прийнятний час, що зумовлює широке використання евристичних та метоевристичних алгоритмів. Для цілей даного дослідження, де основна увага приділяється математичній постановці, розглядаються ключові варіанти задачі, що є основою для

подальшого ускладнення моделі, зокрема, задача з обмеженням вантажопідйомності.

На практиці багато параметрів логістичних систем є невизначеними. Стохастична задача маршрутизації транспорту розширює класичну задачу, моделюючи ключові параметри, такі як попит клієнтів, час у дорозі або наявність клієнта, як випадкові величини з відомими розподілами ймовірностей.

Існуючі підходи, що присвячені збоям, часто моделюють їх як бінарні події (ділянка дороги доступна або недоступна) або як загальне збільшення часу в дорозі. Однак ситуація в Харкові вимагає більш тонкого підходу. Необхідно розрізняти різні типи воєнних збоїв (тимчасовий, загальносистемний параліч через повітряну тривогу проти локального, довготривалого перекриття ділянки через влучання) і моделювати їх виникнення як стохастичний процес.

Дану проблему формально визначаємо як «задачу маршрутизації для гетерогенного парку транспортних засобів з обмеженою вантажністю та воєнними ризиками».

Вона моделюється на повному графі  $G=(V,A)$ , де  $V=\{0,1,\dots,n\}$  – множина вершин, що включає пункт навантаження (вершина 0) та  $n$  клієнтів (вершини)  $V_c = \{1,\dots,n\}$ , а  $A$  – множина дуг, що з'єднують ці вершини.

Мета полягає у визначенні набору маршрутів для гетерогенного парку транспортних засобів  $K$ , кожен з яких має вантажопідйомність  $Q_k$ , що починаються і закінчуються в пункті навантаження. Конфігурація маршрутів має забезпечувати мінімізацію сукупних витрат, що інтегрують прямі операційні видатки та ризико-орієнтовані штрафи, трансформуючи модель у систему стратегічного планування, здатну до превентивної адаптації топології у відповідь на загрози національній безпеці. Модель базується на наступній системі припущень.

Мережа – існує єдиний пункт навантаження (вершина 0) з відомими географічними координатами. Координати всіх  $n$  клієнтів також відомі.

Парк транспортних засобів (ТЗ) – парк транспортних засобів  $K$  є гетерогенним, тобто складається з автомобілів різних типів, кожен з яких характеризується унікальною вантажопідйомністю  $Q_k$  та технічними характеристиками.

Попит – попит  $d_i$  кожного клієнта  $i$  є випадковою величиною, що підпорядковується відомому дискретному розподілу ймовірностей  $P(d_i) = d$ . Попити різних клієнтів вважаються незалежними.

Маршрути – розглядаються маятникові та розвізні маршрути. Кожен клієнт обслуговується рівно один раз одним транспортним засобом. Підмаршрути, що не включають пункт навантаження, заборонені.

Виникнення сигналів повітряної тривоги моделюється як Пуассонівський процес з середньою інтенсивністю  $\lambda$  (кількість тривог на годину). Це припущення обґрунтоване випадковим та незалежним характером виникнення загроз.

Тривалість повітряної тривоги,  $T_{\text{тривога}}$ , є випадковою величиною, що підпорядковується певному розподілу ймовірностей, параметри якого визначаються на основі статистичних даних.

Під час дії сигналу повітряної тривоги робота багатьох підприємств припиняється. Це призводить до виникнення витрат через простій, але не завдає прямої шкоди транспортному засобу чи вантажу.

Пропонується використовувати розгорнуту математичну базу одностадійної робастної моделі маршрутизації. Цей підхід інтегрує воєнні загрози безпосередньо в структуру транспортної мережі, перетворюючи «ймовірнісні збої» на «вартісні штрафи» дуг графу  $V$  якості цільової функції використовуються узагальнена вартість реалізації транспортного процесу в умовах воєнного ризику  $Z$ .

Цільова функція представлена у вигляді

$$Z = \sum_{k \in K} \sum_{(i,j) \in A} (C_{ij}^{op} + \varepsilon_3 \cdot R_{ij}) \cdot x_{ijk} \rightarrow \min, \quad (2.1)$$

де  $C_{ij}^{op}$  – операційні витрати, грн;

$\varepsilon_3$  – коефіцієнт критичності загрози, безрозмірна величина, що визначає стратегічний пріоритет безпеки у логістичній системі;

$R_{ij}$  – вартість інтегрованого воєнного ризику дуги  $(i, j)$ , що відображає сукупні очікувані втрати системи (у грошовому еквіваленті) при проходженні транспортним засобом даного сегмента мережі в умовах воєнного стану, грн;

$x_{ijk}$  – бінарна змінна рішення, 1 якщо ТЗ  $k$  проходить по дузі  $(i, j)$ , 0 – інакше.

Застосування показника  $\varepsilon_3$  для позначення критичності загрози дозволяє чітко виділити цей параметр як стратегічний детермінант у запропонованій моделі. При  $\varepsilon_3 = 1$  – система перебуває в стані нейтралітету до ризику, де вартість безпеки еквівалентна прямим операційним витратам. При  $\varepsilon_3 > 1$  модель стає ризико-аверсивною, що змушує обирати безпечніші (хоча й довші) маршрути, формуючи «безпековий каркас» логістичної мережі. При  $\varepsilon_3 \rightarrow \infty$  досягається режим максимальної стійкості, де проїзд через будь-яку ділянку з виявленим ризиком блокується, якщо існують будь-які альтернативні шляхи.

$$C_{ij}^{op} = c_{dist} \cdot L_{ij} + c_{time} \cdot \left( \frac{L_{ij}}{v_k} + t_i \right), \quad (2.2)$$

де  $c_{dist}$  – вартість 1 км пробігу, грн/км;

$L_{ij}$  – відстань між вершинами  $i$  та  $j$ , км;

$c_{time}$  – вартість 1 години роботи ТЗ та водія, грн/год;

$v_k$  – середня технічна швидкість ТЗ  $k$ , км/год;

$t_i$  – час обслуговування клієнта  $i$ , год.

Вартість інтегрованого воєнного ризику дуги  $(i, j)$  це сукупний штраф за проходження небезпечної ділянки, що включає два типи загроз

$$R_{ij} = \underbrace{\left( \frac{L_{ij} \cdot \lambda \cdot T \cdot C_{pr}}{v_k} \right)}_{\text{Темпоральний ризик (тривоги)}} + \underbrace{\left( \mathcal{P}_{ij} \cdot \Delta_{ij} \right)}_{\text{Топологічний ризик (блокування)}}, \quad (2.3)$$

де  $\lambda$  – інтенсивність повітряних тривог, тривог/год;

$T$  – очікувана тривалість однієї тривоги, год,

$C_{pr}$  – витрати на простій за годину, грн/год,

$\mathcal{P}_{ij}$  – просторова ймовірність блокування дуги  $(i, j)$  внаслідок кінетичного удару;

$\Delta_{ij}$  – витрати на найкоротший об'їзд дуги, грн.

Обмеження – обслуговування клієнтів – кожен клієнт має бути відвіданий рівно один раз

$$\sum_{k \in K} \sum_i x_{ijk} = 1, \quad \forall j \in V_c. \quad (2.4)$$

Збереження потоку – якщо транспортний засіб прибуває до клієнта, він повинен і виїхати від нього

$$\sum_i x_{ijk} - \sum_{l \in V} x_{jlk} = 0, \quad \forall j \in V_c, \forall k \in K. \quad (2.5)$$

Виїзд з пункту навантаження та повернення до нього – кожен задіяний ТЗ повинен виїхати з пункту навантаження і повернутися до нього.

$$\sum_{j \in V_c} x_{0,jk} \leq 1, \quad \forall k \in K, \quad (2.6)$$

$$\sum_{i \in V_c} x_{i0k} \leq 1, \quad \forall k \in Kn, \quad (2.7)$$

$$\sum_{j \in V_c} x_{0jk} - \sum_{i \in V_c} x_{i0k} = 0, \quad \forall k \in K. \quad (2.8)$$

Для забезпечення структурної цілісності маршрутів та запобігання утворенню замкнених циклів, що не проходять через пункт навантаження, до системи обмежень додається блок нерівностей, що дозволяє гарантувати, що кожен транспортний засіб виконує зв'язний маршрут, інтегрований у «безпековий каркас» мережі.

Математично обмеження для усунення підциклів записується наступним чином

$$u_{ik} - u_{jk} + Q_k \cdot x_{ijk} \leq Q_k - d_j, \quad \forall (i, j) \in A, i, j \neq 0, \forall k \in K. \quad (2.9)$$

де  $u_{ik}, u_{jk}$  – допоміжні невід'ємні змінні, що характеризують стан транспортного засобу  $k$  (поточне завантаження або порядковий номер відвідування) після обслуговування клієнтів  $i$  та  $j$  відповідно;

$Q_k$  – номінальна вантажопідйомність транспортного засобу  $k$ , т;

$d_j$  – величина попиту клієнта  $j$ , т;

$x_{ijk}$  – бінарна змінна рішення, що дорівнює 1, якщо дуга  $(i, j)$  входить до маршруту ТЗ  $k$ , та 0 – в іншому випадку.

Використання цього обмеження в межах одностадійної робастної моделі має критичне значення для логістики в умовах воєнного стану. Воно забезпечує формування таких маршрутних схем, де кожен транспортний засіб має гарантований зв'язок із базовим пунктом дислокації, що мінімізує ризики ізоляції ТЗ у небезпечних зонах транспортного графу.

Запропонована математична модель (2.1) за своєю суттю є багатокритеріальною, оскільки логістичне управління в умовах воєнного

стану вимагає одночасного досягнення двох суперечливих цілей – мінімізації операційних витрат та мінімізації воєнних ризиків.

Формально задача може бути представлена як одночасна мінімізація двох цільових функцій  $f_1(x)$  – економічного критерію мінімізація прямих операційних витрат

$$f_1(x) = \sum_{k \in K} \sum_{(i,j) \in A} C_{ij}^{op} \cdot x_{ijk} \rightarrow \min, \quad (2.10)$$

та безпекового критерію  $f_2(x)$  – мінімізація інтегрованого воєнного ризику

$$f_2(x) = \sum_{k \in K} \sum_{(i,j) \in A} R_{ij} \cdot x_{ijk} \rightarrow \min. \quad (2.11)$$

Оскільки ці критерії є суперечливими (найбезпечніші маршрути зазвичай є довгими та дорожчими), не існує єдиного розв'язку, який би мінімізував обидві функції одночасно. Замість цього модель дозволяє знайти множину Парето-оптимальних розв'язків – таких варіантів маршрутизації, де неможливо покращити показник безпеки без збільшення фінансових витрат. Цільова функція (2.1) використовує метод скаляризації (зваженої суми), де коефіцієнт критичності загрози  $\varepsilon_3$  виступає параметром, що визначає положення системи на фронті Парето – низькі значення  $\varepsilon_3$  зміщують рішення в бік економічного екстремуму (короткі, але ризиковані маршрути); високі значення  $\varepsilon_3$  зміщують рішення в бік безпекового екстремуму (максимально захищені маршрути, «безпековий каркас»).

Такий підхід трансформує модель із інструменту розрахунку «ідеального» числа в аналітичну систему підтримки прийняття рішень. Це дозволяє логісту не просто отримувати маршрут, а бачити ціну безпеки у грошовому еквіваленті та приймати стратегічно обґрунтовані рішення залежно від поточної інтенсивності воєнних загроз у місті.

У межах розробленої робастної моделі, ймовірність  $\mathcal{P}_{ij}$  просторова ймовірність блокування дуги  $(i, j)$  внаслідок кінетичного удару розглядається як функція від інтенсивності вогневого впливу в межах конкретного сегмента транспортної мережі. На відміну від класичних стохастичних задач, де ймовірність збою є статичною, у даному дослідженні вона розраховується на основі просторового Пуассонівського процесу.

Припускаючи, що точки кінетичних ударів (влучань) розподілені у міському просторі відповідно до неоднорідного Пуассонівського процесу, ймовірність того, що на дузі  $(i, j)$  відбудеться хоча б одна подія, яка призведе до її блокування, визначається через функцію інтенсивності

$$\mathcal{P}_{ij} = 1 - \exp\left(-\int_{L_{ij}} \Lambda(s) ds\right), \quad (2.12)$$

де  $\Lambda(s)$  – функція просторової інтенсивності ударів у точці  $s$ , що відображає кількість очікуваних інцидентів на одиницю довжини або площі, од/км;

$s$  – вектор просторових координат точки на дузі, км;

$ds$  – диференціал довжини дуги, км;

$L_{ij}$  – множина точок, що утворюють траєкторію дуги графу від вузла  $i$  до вузла  $j$ , од.

Функція інтенсивності  $\Lambda(s)$  розраховується на основі ретроспективного аналізу точок влучань (інцидентів) у міському середовищі

$$\Lambda(s) = \frac{1}{h^2} \sum_{n=1}^{N_{\text{інцидентів}}} K\left(\frac{s - s_n}{h}\right), \quad (2.13)$$

де  $N_{\text{інцидентів}}$  – загальна кількість зафіксованих воєнних інцидентів, од.;

$s_n$  – координати місця  $n$ -го інциденту, км;

$h$  – радіус згладжування, що визначає зону впливу інциденту, км;  
 $K(\cdot)$  – ядрова функція (Гауссове ядро), що розподіляє вагу інциденту залежно від відстані;

$1/h^2$  – нормувальний коефіцієнт, що приводить площинну інтенсивність до відповідної розмірності,  $1/\text{км}^2$ .

Для практичного застосування в алгоритмах маршрутизації, де граф мережі розбитий на сегменти, використовується спрощена форма

$$\mathcal{P}_{ij} \approx 1 - \exp(-\bar{\Lambda}_{zone} \cdot L_{ij}), \quad (2.14)$$

де  $\bar{\Lambda}_{zone}$  – середня питома щільність воєнних загроз у зоні проходження дуги, од./км;

$L_{ij}$  – фізична довжина сегмента дороги (дуги), км.

Для підвищення точності оцінки воєнного ризику в межах міської логістичної системи Харкова припущення про рівномірний розподіл інтенсивності загроз  $\lambda$  для всієї території міста замінюється на підхід стратегічного зонування. Інтенсивність сигналів повітряної тривоги та кінетичного впливу розглядається як функція від просторового розташування району, що обумовлено його близькістю до лінії фронту, стратегічною важливістю об'єктів інфраструктури та історичною щільністю обстрілів.

Математично це виражається через введення зонального коефіцієнта інтенсивності

$$\lambda_j = \lambda_{base} \cdot \omega_{zone} \quad (2.15)$$

де  $\lambda_j$  – інтенсивність загроз для  $j$ -го району міста, тривог/год;

$\lambda_{base}$  – базова інтенсивність затримок (тривог) для міста в цілому, тривог/год;

$\omega_{zone}$  – ваговий коефіцієнт безпекової вразливості району.

Використовуються наступні вагові коефіцієнти  $\omega_{zone} = 1$  – стандартна міська зона (базовий рівень ризику),  $\omega_{zone} = 1,5 - 2,5$  – зони підвищеної небезпеки (райони з високою щільністю влучань або близькості до об'єктів критичної інфраструктури),  $\omega_{zone} = 0,5 - 0,8$  – умовно безпечні зони (райони з мінімальною статистикою інцидентів та віддаленістю від потенційних цілей).

Приклад територіальної диференціації для м. Харків. Зони високого ризику (наприклад, Північна Салтівка, П'ятихатки). Характеризуються підвищеним значенням через більшу ймовірність не лише загальних тривог, а й локальних тактичних загроз (обстрілів, активності дронів). Це призводить до експоненціального зростання вартості ризику для дуг, що пролягають через ці райони. Зони помірною ризику (наприклад, Центральні райони, Павлове Поле). Мають середні значення коефіцієнта, де основний вплив мають загальноміські загрози ракетних ударів. Зони відносного безпекового буфера (південно-західні околиці). Можуть мати значення  $\omega_{zone} < 1$ , що робить ці маршрути пріоритетними для формування «безпекового каркаса».

Для систематизації процесу формування оптимальних маршрутів в умовах воєнного стану та візуалізації взаємозв'язків між вхідними параметрами середовища і кінцевим планом перевезень розроблено логічну схему алгоритму. Цей алгоритм базується на принципах одностадійної робастної оптимізації, де воєнний ризик інтегрується безпосередньо у вартісні характеристики транспортної мережі. На рисунку 2.5 представлено структуру процесу трансформації геопросторової та експлуатаційної інформації у стратегічно стійкий «безпековий каркас» маршрутів.

Логічна структура алгоритму передбачає послідовне виконання чотирьох функціональних блоків, кожен з яких забезпечує підготовку та опрацювання специфічних даних.

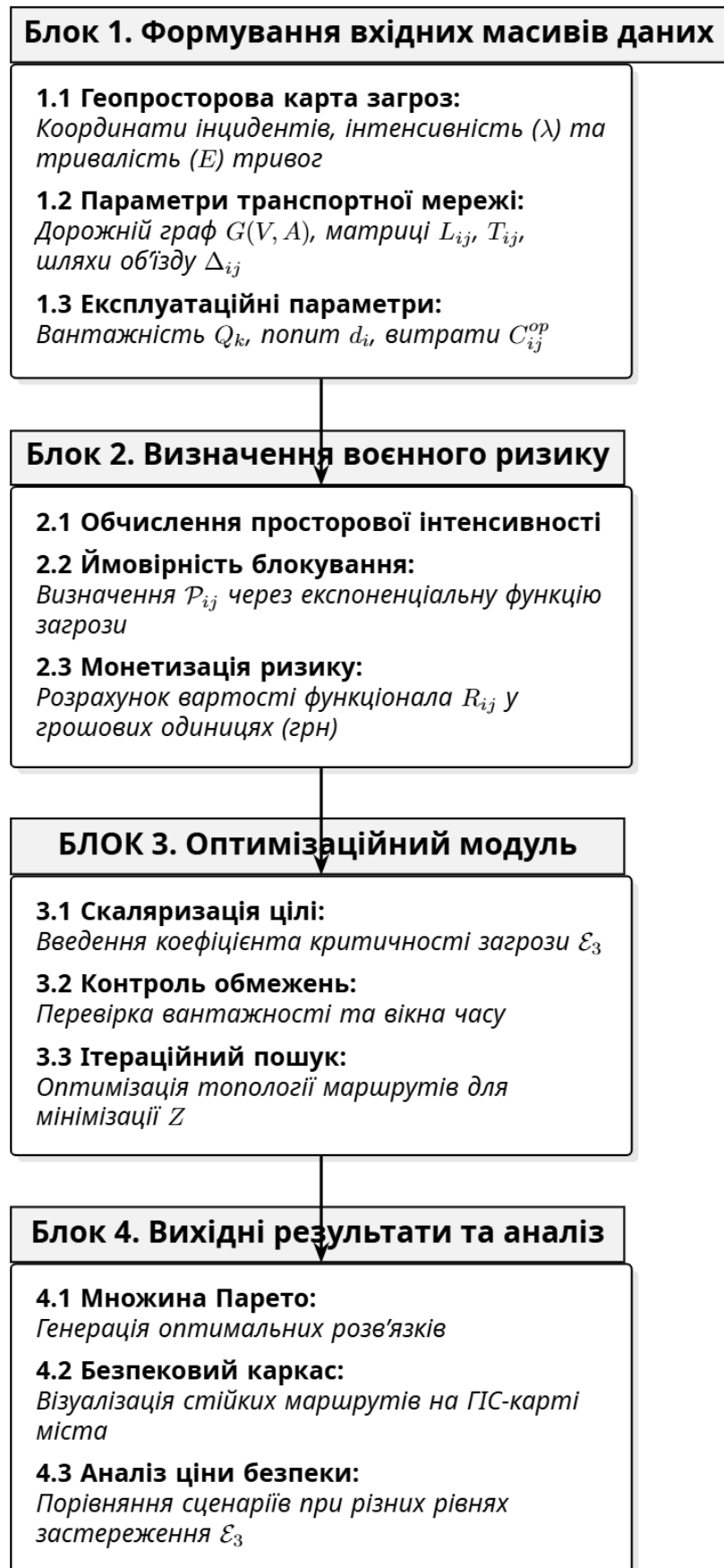


Рисунок 2.5 – Логічна схема алгоритму формування безпекового каркаса маршрутів в умовах воєнних загроз

Блок 1. Формування вхідних масивів даних, на початковому етапі здійснюється синтез інформації з трьох джерел. Геопросторова карта загроз містить динамічні дані про воєнні інциденти та параметри повітряних тривоги. Параметри транспортної мережі описують топологію дорожнього графа, а експлуатаційні параметри фіксують технічні можливості парку ТЗ та потреби клієнтів.

Важливою особливістю є врахування вартості об'їздів для кожної дуги, що створює базу для монетизації ризику.

Блок 2. Визначення воєнного ризику, цей блок є методологічним ядром алгоритму. На основі ретроспективного аналізу інцидентів за допомогою методу ядерного згладжування щільності обчислюється функція просторової інтенсивності загроз. Це дозволяє визначити ймовірність блокування кожної дуги. Кінцевим результатом блоку є розрахунок вартісного функціонала, який переводить воєнну небезпеку у грошовий еквівалент, забезпечуючи адитивність ризику та операційних витрат.

Блок 3. Оптимізаційний модуль, на даному етапі реалізується математична модель. Через коефіцієнт критичності загрози здійснюється скаляризація цільової функції, що дозволяє враховувати рівень застереження ОПР (особи, що приймає рішення). Алгоритм проводить ітераційний пошук оптимальної топології маршрутів, суворо контролюючи систему обмежень щодо вантажності ТЗ та часових рамок роботи. На відміну від моделей із рекурсом, тут забезпечується превентивна стійкість плану до можливих збоїв.

Блок 4. Вихідні результати та аналіз, завершальний етап присвячений аналітичній підтримці прийняття рішень. Алгоритм генерує множину Парето-оптимальних рішень, що дозволяє порівнювати різні сценарії логістичного забезпечення за критеріями «витрати–безпека». Результати візуалізуються на ГІС-карті міста у вигляді «безпекового каркаса», який демонструє найбільш захищені траєкторії руху. Це дає змогу логісту оцінити «ціну безпеки» та обрати стратегію, яка відповідає поточному рівню загроз у міському середовищі.

Для реалізації оптимізаційного процесу та проведення подальших експериментальних досліджень необхідно визначити систему керованих змінних, за допомогою яких здійснюється пошук екстремуму цільової функції. У межах розробленої моделі робастної маршрутизації керовані змінні поділяються на змінні рішення та керовані параметри впливу, що формують умови проведення експерименту.

Основним інструментом формування оптимальної топології маршрутів є бінарна змінна  $x_{ijk}$ , яка визначає факт включення дуги  $(i, j)$  до маршруту конкретного транспортного засобу. Вибір значень  $x_{ijk}$  безпосередньо змінює значення цільової функції  $Z$ , дозволяючи алгоритму знаходити компроміс між операційними витратами та інтегрованим воєнним ризиком.

Допоміжною керованою змінною стану є  $u_{ik}$ , що використовується для забезпечення логічної зв'язності маршруту та усунення підциклів

$$u_{ik} \geq 0, \quad \forall i \in V \setminus \{0\}, \forall k \in K, \quad (2.16)$$

де  $u_{ik}$  – відображає кумулятивне завантаження (або порядковий номер відвідування клієнта) транспортного засобу  $k$  після обслуговування вузла  $i$ .

Для оцінки ефективності моделі та дослідження її чутливості до зміни безпекової ситуації вводиться функціональна залежність відгуку системи від керованих параметрів середовища. Математично постановка задачі для проведення експериментальних досліджень записується у вигляді

$$Z_{opt} = f(\mathcal{E}_3, \omega_{zone}) \rightarrow \min, \quad (2.17)$$

де  $Z_{opt}$  – мінімальне значення узагальнених логістичних витрат з урахуванням воєнних ризиків, грн;

$f$  – функціонал оптимізації.

У межах планування експерименту параметри  $\mathcal{E}_3, \omega_{zone}$  виступають як незалежні фактори впливу. Коефіцієнт критичності загрози дозволяє моделювати рівень «застереження» або стратегічного пріоритету безпеки. Варіювання цього параметра в межах експерименту дає змогу побудувати фронт Парето та визначити «ціну безпеки» – величину зростання операційних витрат при переході до максимально захищених маршрутів.

Зональний коефіцієнт відображає територіальну неоднорідність інтенсивності вогневого впливу. Експериментальне дослідження впливу  $\omega_{zone}$  (наприклад, для районів з різною інтенсивністю обстрілів у м. Харків) дозволяє оцінити здатність моделі до адаптивної перебудови маршрутів «безпекового каркаса» у відповідь на зміну просторової карти ризиків.

Така постановка математичного апарату дозволяє у подальших розділах роботи реалізувати багатofакторний план експерименту, за результатами якого буде встановлено закономірності трансформації транспортної мережі міста під впливом воєнних загроз різної інтенсивності.

Для практичного застосування моделі її параметри повинні бути обґрунтовані реальними даними. В таблицях 2.3 та 2.4 представлені узагальнюючі ключові параметри та джерела даних для їх визначення.

Таблиця 2.3 – Компоненти витрат та джерела даних для їх розрахунку

Компонент	Складові	Джерела даних та методика розрахунку
Операційні витрати, грн/км	Паливо, мастильні матеріали, амортизація, ремонт, заміна шин, зарплата водія	Ринкові ціни на ПММ, тарифи на перевезення
Витрати на простій, грн/год	Погодинна ставка водія, пропорційна частина постійних витрат (страхування, ліцензії), паливо на холостому ходу	Дані про середню зарплату водіїв у Харкові. Аналітичні дані про вартість простою

Таблиця 2.4 – Ключові параметри для моделювання воєнних ризиків у Харкові

Параметр	Позначення	Джерела даних та методика розрахунку
Інтенсивність повітряних тривог, тривог/год	$\lambda$	Статистика повітряних тривог для Харківської області за 2024-2025 рр.. Розраховується як (загальна кількість тривог) / (загальна кількість годин у періоді)
Очікувана тривалість тривоги, год	T	Статистичні дані про середню та загальну тривалість тривог. Може бути розрахована як середнє арифметичне або як параметр відповідного розподілу

Наукова новизна даного дослідження полягає не у створенні принципово нового алгоритму розв'язання задач маршрутизації, а в комплексній інтеграції контекстно-специфічного, багатокomпонентного фактора воєнного ризику в рамки моделі маршрутизації. Ключові аспекти новизни полягають у формулювання нової проблеми. Робота формально визначає новий клас задач маршрутизації, адаптований до умов функціонування логістики в зонах конфлікту, що є малодослідженою сферою.

Запропонований підхід виходить за межі загального поняття «збій», моделюючи два різні за природою та наслідками воєнні явища (загальносистемна зупинка через тривоги та локальне руйнування мережі) за допомогою різних стохастичних процесів та функцій витрат.

Математична модель пропонує конкретний, керований даними інструмент для підтримки прийняття рішень у гострій реальній проблемі, демонструючи, як теоретичні моделі дослідження операцій можуть бути адаптовані до екстремальних операційних середовищ.

У даній роботі розроблено та представлено модель, призначену для оптимізації міських вантажних перевезень в умовах воєнного конфлікту на прикладі міста Харків. Модель інтегрує класичну модель з унікальним, багатокomпонентним фактором воєнного ризику. Цей ризик включає як

системні збої у вигляді простоїв через повітряні тривоги, так і локальні порушення зв'язності дорожньої мережі.

Ключовим результатом є те, що модель дозволяє кількісно оцінити ці ризики та включити їх очікувану вартість безпосередньо в цільову функцію оптимізації. Це дає можливість планувальникам логістики приймати більш раціональні, економічно обґрунтовані та стійкі рішення. Наприклад, модель може показати, що за певних умов вигідніше використовувати коротші маршрути з меншою кількістю клієнтів, щоб зменшити загальний «час експозиції» до ризику повітряних тривог, навіть якщо це збільшує сумарний пробіг. Такий компроміс є невидимим для традиційних моделей оптимізації.

Незважаючи на свою комплексність, запропонована модель має ряд обмежень, які важливо усвідомлювати:

- виключення кінетичного ризику – модель не враховує ймовірність та вартість фізичного знищення транспортного засобу або вантажу. Це є значним спрощенням, і повна модель управління ризиками повинна включати цей аспект;

- доступність даних – точність параметризації, особливо ймовірності руйнування ділянки дуже залежить від наявності даних, які можуть бути недоступними або засекреченими. У самій простій постановці модель припускає рівномірний ризик по місту;

- припущення про незалежність – модель припускає, що повітряні тривоги та руйнування ланок є незалежними випадковими процесами. Насправді, масована атака може одночасно спричинити руйнування інфраструктури, оголошення тривоги та вплинути на поведінку споживачів.

#### 2.4 Методологічні основи вирішення задачі маршрутизації в умовах перманентної нестабільності

Концептуальна модель, розроблена в попередньому розділі, окреслює архітектуру вирішення задачі оптимізації міських вантажних перевезень в

умовах екстремальних загроз, характерних для міста Харків. Однак для її валідації та практичної реалізації необхідне глибоке теоретичне та методологічне обґрунтування.

Задача маршрутизації транспортних засобів, вперше сформульована Данцигом та Рамзером, є наріжним каменем комбінаторної оптимізації в логістиці [93]. У своїй класичній постановці вона передбачає пошук набору оптимальних маршрутів для парку транспортних засобів з метою мінімізації сумарних витрат (зазвичай, відстані або часу) при обслуговуванні географічно розподілених клієнтів [94]. Ця задача належить до класу NP-складних, що робить знаходження точного оптимального розв'язку для реальних масштабних мереж обчислювально неможливим за прийнятний час. Це зумовило розвиток численних евристичних та метаевристичних алгоритмів. Базові детерміновані варіанти, такі як задача з обмеженням вантажопідйомності та задача з часовими вікнами [95], складають основу для більш складних моделей, включно з тією, що розглядається в даній роботі.

Детерміновані моделі базуються на припущенні, що всі параметри системи (попит, час у дорозі, доступність клієнтів) є відомими та сталими. В реальності логістичні системи пронизані невизначеністю. Це призвело до розвитку стохастичних задач маршрутизації, де ключові параметри моделюються як випадкові величини з відомими законами розподілу. Для контексту даного дослідження, що враховує «комерційну невизначеність», найбільш релевантною є задача зі стохастичним попитом.

Домінуючою парадигмою для вирішення таких задач є двохетапне стохастичне програмування з рекурсом. Цей підхід ідеально відображає процес прийняття рішень в логістиці (рис.2.5).

Перехід від операційної до «безпекової невизначеності» [96] вимагає аналізу іншого класу моделей – задач маршрутизації зі збоями та ширшої концепції стійкості ланцюгів постачання» [97].

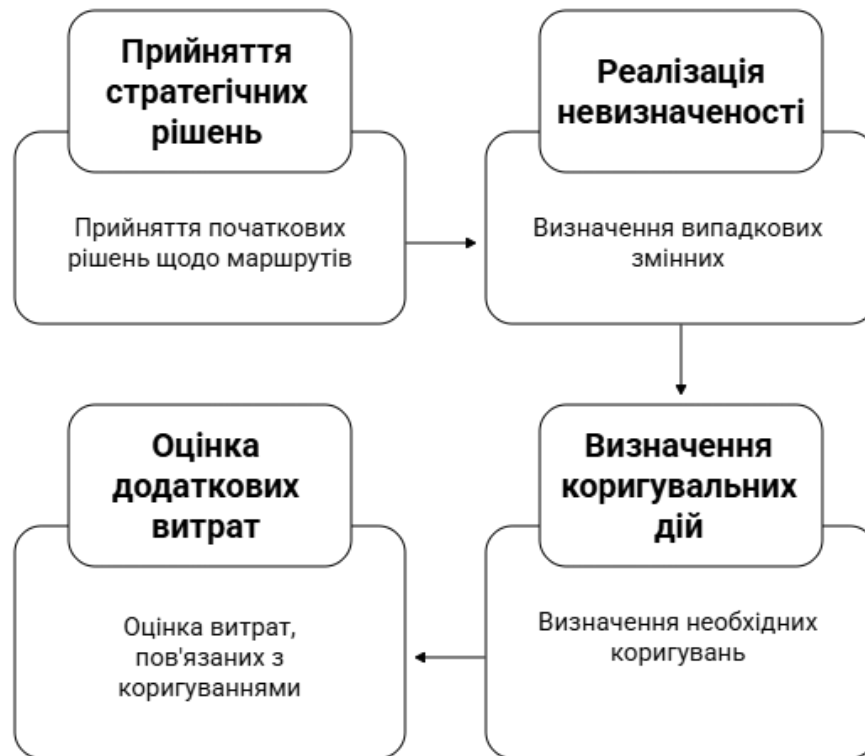


Рисунок 2.5 – Схема прийняття рішень в задачах з двоетапним стохастичним програмуванням з рекурсом

Стійкість визначається як здатність системи готуватися до несприятливих подій, поглинати їх наслідки, відновлюватися та адаптуватися до нових умов.

Однак існуючі моделі мають суттєві обмеження при застосуванні до умов ведення бойових дій. Зазвичай, вони розглядають збої як прості, незалежні та бінарні події – наприклад, ділянка дороги або доступна, або недоступна, або час у дорозі загально збільшується на певну величину. Така спрощена логіка нездатна адекватно відобразити складну природу воєнних ризиків.

Воєнні події характеризуються кореляцією та потенціалом до каскадних відмов. Наприклад, оголошення повітряної тривоги – це системний, одночасний збій, що паралізує діяльність усіх агентів у місті. Це не локальна відмова однієї ланки мережі, а загальносистемна подія. Ракетний удар може не лише заблокувати одну вулицю, але й спричинити каскад наслідків: перенаправлення транспортних потоків, виникнення вторинних заторів на

об'їзних шляхах, зміну поведінки клієнтів (сплеск або падіння попиту) [98] та, можливо, спровокувати нову повітряну тривогу. Моделі, що припускають незалежність відмов ланок, не можуть вловити цю взаємозалежність.

Дослідження, присвячені відновленню інфраструктури України [99] та управлінню ризиками в умовах геополітичної нестабільності [100], підкреслюють, що збої не є випадковими в традиційному сенсі, вони є результатом цілеспрямованих дій супротивника, що може мати власну стратегію, спрямовану на руйнування логістичних ланцюгів. Це принципово відрізняється від моделювання випадкових поломок чи природних катаклізмів.

Суть проблеми полягає в тому, що стандартні моделі маршрутизації добре справляються з операційною невизначеністю (попит, трафік), а стандартні моделі маршрутизації зі збоями – з винятковими збоями (поломки, перекриття). Однак ситуація в Харкові не є ні стабільною системою з випадковими флуктуаціями, ні системою, що переживає рідкісні виняткові події. Це стан перманентної, системної нестабільності, де воєнні ризики є не подією, а постійним, структурним параметром операційного середовища.

Неадекватність існуючих підходів є не просто технічною, а концептуальною. Вони не були розроблені для середовища, де одночасно діють кілька типів стохастичних процесів різної природи (рис. 2.6). Внутрішня операційна невизначеність визначає стохастичний попит клієнтів. Зовнішня системна темпоральна невизначеність визначає випадкові за часом виникнення та тривалістю загальноміські зупинки (повітряні тривоги). Зовнішня локальна топологічна невизначеність визначає випадкові за місцем виникнення блокування ділянок дорожньої мережі (наслідки кінетичних ударів).

Таким чином, у науковій літературі відсутня єдина модель, яка б інтегрувала ці три шари невизначеності.



Рисунок 2.6 – Невизначеність на основі її джерела та впливу

Для вирішення такого роду задач на перший план виходить імітаційне моделювання. Це метод дослідження, при якому досліджувана система замінюється моделлю, що з достатньою точністю описує її функціонування, і з цією моделлю проводяться обчислювальні експерименти. Імітація дозволяє аналізувати складні системи з численними взаємодіючими стохастичними процесами, не вимагаючи виведення аналітичного розв'язку в замкненій формі. Вона є потужним інструментом для оцінки очікуваних значень, аналізу чутливості та вивчення емерджентної поведінки системи – тобто таких властивостей, які виникають на макрорівні внаслідок взаємодії елементів на мікрорівні, але не є очевидними з властивостей самих елементів. Широке застосування імітації в логістиці та управлінні ланцюгами постачань для вирішення задач оптимізації в умовах невизначеності є добре задокументованим фактом.

Для моделювання логістичної системи Харкова можуть бути використані кілька парадигм імітаційного моделювання, кожна з яких має свої переваги.

Дискретно-подійне моделювання є фундаментальним підходом для даної задачі. Логістичний процес природно розглядається як послідовність дискретних подій, що відбуваються в часі: «ТЗ виїхав зі складу», «ТЗ прибув до клієнта  $i$ », «розпочалася повітряна тривога», «завершилася повітряна тривога», «надійшло повідомлення про блокування ділянки  $(i, j)$ » тощо. Модель дискретно-подійного моделювання просувається в часі не безперервно, а «стрибаючи» від однієї події до наступної, що робить її обчислювально ефективною. Цей підхід дозволяє точно розрахувати загальний час виконання маршрутів, тривалість простоїв, довжину об'їзних шляхів та, відповідно, узагальнену вартість реалізації транспортного процесу в умовах воєнного ризику для будь-якого конкретного згенерованого сценарію.

Агентно-орієнтоване моделювання є більш просунутою парадигмою, що доповнює дискретно-подійне моделювання. В рамках агентно-орієнтованого моделювання ключові учасники системи – транспортні засоби (водії), диспетчери, клієнти і навіть абстрактні «агенти загрози» – моделюються як автономні сутності (агенти), що мають власний стан, набір правил поведінки та здатність приймати рішення.

Це дозволяє моделювати складніші, адаптивні та децентралізовані процеси. Наприклад, агент-водій може самостійно прийняти рішення про зміну маршруту на основі неформальної інформації (наприклад, повідомлення в локальному чаті про небезпеку), а не чекати на команду від центрального диспетчера. Таку поведінку важко імплементувати в рамках класичного дискретно-подійного моделювання. Агентно-орієнтоване моделювання є ідеальним інструментом для вивчення того, як індивідуальні рішення та взаємодії на мікрорівні призводять до глобальних результатів на макрорівні системи.

Імітаційне моделювання саме по собі є інструментом аналізу, а не оптимізації. Щоб знайти оптимальний набір маршрутів, необхідно поєднати його з оптимізаційним алгоритмом. Сучасним та ефективним підходом для цього є симуляційно-евристичний підхід. Ця методологія інтегрує імітаційне моделювання (зазвичай, на основі методу Монте-Карло) безпосередньо в цикл роботи метаевристичного алгоритму (наприклад, генетичного алгоритму, імітації відпалу або адаптивного пошуку з великими околицями). Схема роботи алгоритму наступна (рис. 2.7), метаевристика генерує новий, потенційно кращий набір маршрутів (початкове рішення), цей набір маршрутів передається в імітаційну модель. Імітатор проводить серію експериментів («прогонів»), генеруючи певну кількість стохастичних сценаріїв (різні реалізації попиту, тривоги, руйнувань), за результатами симуляцій розраховується оцінка якості початкового рішення (наприклад, середні сумарні витрати та їх стандартне відхилення). Ця оцінка повертається метаевристиці, яка використовує її для подальшого пошуку в просторі рішень.



Рисунок 2.7 – Процес оптимізації маршрутів на основі симуляційно-евристичного підходу

Такий підхід дозволяє ефективно вирішувати стохастичні задачі комбінаторної оптимізації, до яких належить задача, що розглядається.

Важливо розуміти, що запропонована модель є статичною моделлю планування. Вона генерує «найкращий» план на день, виходячи зі статистичних очікувань. Однак реальне операційне середовище є високодинамічним. Несподіваний ракетний удар може миттєво зробити оптимальний план неактуальним. Це означає, що статична модель не є самоціллю. Вона є першим, стратегічним рівнем у більш комплексній, багаторівневій системі підтримки прийняття рішень.

Повна архітектура такої системи повинна включати (рис. 2.8):

- стратегічний рівень (щоденне планування), один раз на день розв'язується задача маршрутизації для генерації початкового набору маршрутів;
- операційний рівень (реальний час), імітаційна модель безперервно відстежує стан системи (положення ТЗ, поточний час, статус тривоги). При виникненні значного збою (тригерної події, наприклад, повідомлення про руйнування мосту), запускається модуль переоптимізації (наприклад, швидка евристика вставки), який динамічно адаптує маршрути.



Рисунок 2.8 – Процес функціонування багаторівневої системи підтримки прийняття рішень

Таке бачення перетворює математичну модель з кінцевого продукту на ключовий компонент у значно більшій, практично орієнтованій та академічно багатшій динамічній системі підтримки рішень.

Запропонований підхід виходить за межі загального поняття «збій». Він розрізняє та моделює два принципово різні за своєю природою та наслідками воєнного явища за допомогою різних математичних апаратів:

- загальносистемні темпоральні збої (прості через повітряні тривоги), що впливають на часову вісь виконання операцій;
- локальні топологічні збої (блокування ділянок мережі), що впливають на зв'язність та конфігурацію транспортного графу.

Ключова відмінність моделі полягає у переході від використання абстрактних, гіпотетичних ймовірностей збоїв до розробки методології їх кількісної оцінки на основі реальних, публічно доступних даних. Це перетворює теоретичну модель на практичний інструмент підтримки прийняття рішень, параметри якого можуть бути відкалібровані для конкретного міста (Харків, Київ, Миколаїв, Одеса тощо) та конкретного періоду часу.

Реалізація розробленої математичної моделі вимагає застосування специфічних методів моделювання, які дозволяють трансформувати недетерміновані чинники воєнного стану в кількісні показники стійкості транспортної мережі. Для досягнення мети дослідження обрано трирівневу структуру моделювання (рис. 2.9).

На першому рівні здійснюється синтез вихідних даних, де об'єктом моделювання виступає база воєнних інцидентів (координати влучань, інтенсивність обстрілів) та дорожній граф міста. За допомогою методів аналізу просторової інтенсивності та ГІС-технологій дані перетворюються на кількісні параметри моделі –  $P_{ij}$  ймовірність блокування дуг та зональні коефіцієнти безпекової вразливості  $\omega_{zone}$ . Результатом цього етапу є сформована вартісна матриця ризиків транспортної мережі, де кожна дуга графа отримує додаткову «вагу», що відображає потенційні втрати від воєнного впливу.



Рисунок 2.9 – Трирівнева ієрархічна структура моделювання робастності логістичних систем в умовах воєнного стану

Другий рівень є ядром системи, де реалізується математичний апарат задачі маршрутизації. Об'єктом моделювання є цільова функція  $Z \rightarrow \min$ , яка інтегрує операційні витрати та монетизовані ризики. У межах розробленої методології вводиться поняття «безпечного каркаса» транспортної мережі міста, що визначається як раціональна підмножина транспортного графа  $G'(V, A') \subseteq G(V, A)$  сформована дугами з мінімальним значенням інтегрованого воєнного ризику  $R_{ij}$  при заданому рівні коефіцієнта критичності загрози  $\mathcal{E}_3$ . Наукова доцільність виокремлення такої структури зумовлена необхідністю переходу від пошуку миттєво оптимальних траєкторій до формування довготривалої стійкої конфігурації логістичних

потоків. На відміну від класичного набору маршрутів, які є динамічними та залежними від поточного попиту, безпековий каркас являє собою топологічно стійку структуру.

Основними властивостями та функціями такого каркаса в умовах воєнного стану є топологічна пріоритезація. Формування каркаса на основі показника  $R_{ij}$  дозволяє виключити з активного планування дуги з високою ймовірністю блокування  $P_{ij}$  або критичними затримками через тривоги, залишаючи в основі мережі лише ті сегменти, що мають найвищий рівень фізичної та темпоральної надійності.

Безпековий каркас будується таким чином, щоб мінімізувати ймовірність потрапляння транспортних засобів у «логістичні пастки» або їх повної ізоляції у небезпечних зонах міського простору. Це досягається шляхом забезпечення надлишкової зв'язності вузлів через дуги з низьким рівнем загрози, що гарантує можливість безпечного виведення ТЗ із будь-якої точки маршруту в разі раптової зміни оперативної обстановки. Каркас виступає превентивним структурним обмеженням для алгоритму оптимізації. Це гарантує, що раціональна топологія маршрутів  $X^*$  завжди базуватиметься на надійному фундаменті дорожньої мережі, незалежно від коливань обсягів замовлень чи кількості задіяних транспортних засобів. Таким чином, використання безпекового каркаса дозволяє логістичній системі зберігати свою функціональну цілісність під постійним тиском зовнішніх воєнних загроз, забезпечуючи перехід від крихких оптимальних рішень до робастних стратегій управління.

Ключовим методом на цьому етапі є скаляризація цільової функції через коефіцієнт критичності загрози  $\mathcal{E}_3$ . Використовуючи метаевристичні алгоритми та систему керованих змінних  $x_{ijk}$  за встановлених обмежень, модель генерує множину Парето-оптимальних рішень. Це дозволяє сформулювати так званій «безпековий каркас» – набір раціональних маршрутів  $X^*$ , які забезпечують баланс між економічною ефективністю та безпекою.

За рахунок застосування методу скаляризації обидва критерії (мінімізація прямих операційних витрат та мінімізація інтегрованого воєнного ризику) об'єднуються в єдину цільову функцію (2.1).

$$Z = f_{econ}(x) + \mathcal{E}_3 \cdot f_{risk}(x) \rightarrow \min, \quad (2.18)$$

де  $f_{econ}(x)$  – мінімізація прямих операційних витрат, прагнення до найкоротших та найдешевших маршрутів;

$f_{risk}(x)$  – мінімізація інтегрованого воєнного ризику, прагнення до вибору найбільш безпечних траєкторій руху.

Коефіцієнт  $\mathcal{E}_3$  виступає як стратегічний детермінант, що визначає рівень застереження особи, яка приймає рішення.

При  $\mathcal{E}_3 = 1$  (нейтралітет до ризику) система оцінює вартість безпеки як еквівалентну прямим операційним витратам. Модель обирає шлях, де сума витрат і ризику є мінімальною.

При  $\mathcal{E}_3 > 1$  (ризико-аверсивний підхід) значення воєнного ризику штучно збільшується. Це змушує алгоритм відхилятися від найкоротших шляхів на користь довших, але безпечніших ділянок, формуючи «безпековий каркас» логістичної мережі.

При  $\mathcal{E}_3 \rightarrow \infty$  (максимальна стійкість) система переходить у режим, де проїзд через будь-яку ділянку з виявленим ризиком блокується, якщо існують будь-які альтернативні (навіть дуже дорогі) шляхи. Завдяки скаляризації через змінний коефіцієнт  $\mathcal{E}_3$ , модель дозволяє знайти множину Парето-оптимальних розв'язків. Це означає, що логіст може порівнювати різні сценарії варіюючи  $\mathcal{E}_3$  від низьких до високих значень, алгоритм генерує набір альтернативних маршрутів. Для кожного значення  $\mathcal{E}_3$  розраховується «ціна безпеки» у грошовому еквіваленті (на скільки гривень збільшуються витрати при зниженні рівня ризику). Остаточний вибір стратегії здійснюється залежно від

поточної інтенсивності воєнних загроз у місті. Такий підхід трансформує модель із простого інструменту розрахунку відстані в аналітичну систему підтримки прийняття рішень, здатну до превентивної адаптації топології маршрутів у відповідь на загрози національній безпеці.

Третій рівень призначений для перевірки надійності отриманих розв'язків. Об'єктом моделювання виступають сценарії виконання плану в умовах випадкового середовища. Використовуючи метод Монте-Карло та апарат Пуассонівських потоків, система симулює численні реалізації транспортного процесу з урахуванням випадкового часу простою  $T$  та інтенсивності повітряних тривог  $\lambda_j$ . Результатом є показники робастності сформованих маршрутів, які підтверджують здатність системи функціонувати без критичних відхилень при різних сценаріях розвитку воєнної загрози.

Важливою особливістю схеми є наявність зворотного зв'язку між етапом верифікації та етапом синтезу. Якщо показники робастності на Рівні 3 не відповідають встановленим критеріям надійності, система ініціює коригування рівня стратегічного застереження  $\mathcal{E}_3$  на Рівні 2. Це забезпечує ітераційне вдосконалення маршрутних планів до моменту досягнення раціональної топології, яка максимально відповідає поточному рівню безпекових викликів у міському середовищі.

Процес перетворення дискретних точок воєнних інцидентів у безперервне поле ризику базується на методі ядерного згладжування щільності KDE, що дозволяє оцінити імовірнісну інтенсивність загроз у будь-якій точці міського простору. Точність та адекватність сформованого «безпекового каркаса» маршрутів критично залежать від двох параметрів KDE – радіусу згладжування та ядрової функції. Радіус згладжування це ключовий параметр, що визначає «зону впливу» окремого інциденту на оточуючу інфраструктуру. Малий радіус  $h \rightarrow 0$  призводить до виникнення «шуму», де ризик концентрується лише в точках влучань. Це робить модель надто оптимістичною, дозволяючи маршрутам проходити в декількох метрах від місця вибуху, що не відповідає реальним умовам безпеки. Великий радіус

$h \rightarrow \infty$  створює ефект надмірного згладжування, де локальні особливості районів (наприклад, різниця між Північною Салтівкою та Центром) нівелюються.

Для формування «безпекового каркаса» раціональним є вибір  $h$ , що корелює з радіусом розльоту уламків та зоною потенційного блокування доріг спецтехнікою ДСНС (зазвичай від 200 до 500 м). Збільшення  $h$  підвищує «консервативність» моделі, змушуючи її обирати значно довші об'їзні шляхи.

Ядрова функція  $K$  визначає закон, за яким вага ризику зменшується при віддаленні від епіцентру інциденту. У роботі використовується Гауссове ядро, що забезпечує плавний перехід значень інтенсивності. Це дозволяє алгоритму оптимізації «бачити» наближення до небезпечної зони та ітераційно віддаляти від неї раціональну топологію маршруту  $X^*$ .

Трансформація геопросторових даних у вартісний штраф дуги  $R_{ij}$  виконується за наступним алгоритмом.

Крок 1. Експорт координат інцидентів, з верифікованих джерел (ДСНС, моніторингові карти) вилучаються координати влучань  $(x_n, y_n)$  за ретроспективний період.

Крок 2. Генерація інтенсивності  $\Lambda(s)$ , у ГІС-середовищі на основі точок інцидентів будується поверхня щільності з обраним радіусом  $h$ . Кожна комірка растра отримує значення питомої щільності загроз  $\Lambda(s)$  на одиницю площі.

Крок 3. Просторове поєднання з дорожньою мережею, граф дорожньої мережі  $G(V, A)$  накладається на отриманий растр інтенсивності. Для кожної дуги  $(i, j)$  виконується операція інтегрування. Визначається середня інтенсивність  $\bar{\Lambda}_{zone}$  вздовж сегмента дороги. Враховуються зональні коефіцієнти  $\omega_{zone}$ , що масштабують ризик залежно від стратегічної важливості району (наприклад,  $\omega_{zone} = 2,5$  для зон високого ризику).

Крок 4. Розрахунок ймовірності блокування  $\mathcal{P}_{ij}$ , на основі довжини дуги  $L_{ij}$  та інтенсивності розраховується ймовірність того, що дуга стане непроїзною

$$\mathcal{P}_{ij} = 1 - \exp(-\bar{\Lambda}_{zone} \cdot L_{ij}), \quad (2.19)$$

Крок 5. Фінальна монетизація та формування ваги  $R_{ij}$ , розрахована ймовірність  $\mathcal{P}_{ij}$  конвертується у вартісний штраф шляхом множення на витрати об'їзду  $\Delta_{ij}$  та додавання темпоральних ризиків (тривог)

$$R_{ij} = \mathcal{E}_3 + \mathcal{P}_{ij} \cdot \Delta_{ij}, \quad (2.20)$$

Отримане значення  $R_{ij}$  у гривнях передається в Оптимізаційний модуль (Рівень 2), де через коефіцієнт  $\mathcal{E}_3$  воно впливає на вибір кінцевого маршруту.

Показник  $\Delta_{ij}$  (додаткові витрати на об'їзд) у запропонованій моделі відображає економічні наслідки блокування конкретної дуги  $(i, j)$  транспортної мережі. В межах ПС-аналізу цей показник розраховується шляхом порівняння характеристик основного шляху та альтернативного маршруту, знайденого за допомогою алгоритмів на графах. Математично  $\Delta_{ij}$  визначається як різниця між витратами на проїзд найкоротшим обхідним шляхом та витратами на проїзд оригінальною дугою

$$\Delta_{ij} = C(\text{Шлях}_{i \rightarrow j}^*) - C_{ij}, \quad (2.21)$$

де  $C(\text{Шлях}_{i \rightarrow j}^*)$  – вартість проїзду найкоротшим альтернативним шляхом від вузла  $i$  до вузла  $j$  за умови, що дуга  $(i, j)$  недоступна;

$C_{ij}$  – прямі операційні витрати на проїзд дугою  $(i, j)$ .

Процес автоматизації розрахунку в ГІС виконується за наступними етапами.

Крок 1. Підготовка топологічно коректного графа, дорожня мережа міста подається у вигляді графа  $G(V,A)$ , де кожна дуга має атрибути – довжина  $L_{ij}$ , середня швидкість  $v_{ij}$  та тип покриття.

Крок 2. Розрахунок базових витрат  $C_{ij}$ , для кожної дуги  $(i, j)$  розраховуються прямі операційні витрати (пальне, амортизація тощо).

Крок 3. Тимчасове виключення цільової дуги, для розрахунку  $\Delta_{ij}$  для конкретної дуги  $(i, j)$  вона тимчасово позначається в ГІС як «непроїзна». Це імітує ситуацію, коли дорога заблокована через воєнний інцидент.

Крок 4. Пошук найкоротшого обхідного шляху (Алгоритм Дейкстри), ГІС-модуль запускає алгоритм пошуку найкоротшого шляху між вузлами  $i$  та  $j$  на модифікованому графі (без дуги  $i \rightarrow j$ ). Алгоритм Дейкстри ітераційно перебирає суміжні вузли, доки не знайде шлях з мінімальною сумарною вагою. Результатом є набір дуг  $\{(i,m),(m,n),\dots,(p,j)\}$ , що утворюють найкоротший шлях.

Крок 5. Обчислення вартості об'їзду, сумуються витрати на всіх дугах знайденого обхідного шляху:  $C(\text{Шлях}_{i \rightarrow j}^*) = \sum_{(u,v) \in \text{Шлях}^*} C_{uv}$

Крок 6. Визначення дельти  $\Delta_{ij}$ , шляхом віднімання базових витрат від вартості об'їзду отримуємо чисте значення «штрафу» за втрату дуги. Це значення заноситься у вартісну матрицю ризиків.

Застосування алгоритму пошуку найкоротшого шляху для визначення  $\Delta_{ij}$  дає моделі наступні переваги: географічна точність –  $\Delta_{ij}$  для центральних районів з густою сіткою доріг буде значно меншою, ніж для околиць або мостів (де об'їзд може становити десятки кілометрів). Це дозволяє моделі адекватно оцінювати «критичність» кожної вулиці. Динамічність – якщо в місті закриваються певні магістралі, ГІС дозволяє миттєво перерахувати всі  $\Delta_{ij}$  для решти мережі.

Оскільки розроблена математична модель базується на принципах робастної оптимізації, виникає необхідність кількісної оцінки стійкості знайдених рішень до випадкових дестабілізуючих впливів воєнного стану. На третьому рівні ієрархічної структури моделювання (етап верифікації) проводиться серія імітаційних експериментів методом Монте-Карло, за результатами яких розраховуються показники робастності сформованих маршрутів.

Для оцінки ефективності раціональної топології  $X^*$  запропоновано використовувати систему взаємопов'язаних показників – коефіцієнт варіації узагальненої вартості, індекс надійності виконання плану, вартість робастності.

1. Коефіцієнт варіації сумарної узагальненої вартості  $CV_Z$ . Даний показник характеризує стабільність логістичних витрат при реалізації різних сценаріїв інтенсивності вогневого впливу та тривалості повітряних тривог. Він відображає ступінь розсіювання фактичних результатів відносно математичного очікування

$$CV_Z = \frac{\sigma_Z}{\bar{Z}} \cdot 100\%, \quad (2.22)$$

де  $\sigma_Z$  – середньоквадратичне відхилення сумарної узагальненої вартості  $Z$ , отримане за результатами  $N$  ітерацій моделювання, грн;

$\bar{Z}$  – середнє арифметичне значення сумарної узагальненої вартості за всіма змодельованими сценаріями, грн.

Мінімізація  $CV_Z$  свідчить про високу передбачуваність функціонування логістичної системи, що дозволяє перевізнику уникати критичних фінансових втрат у нестабільному середовищі.

2. Індекс надійності виконання плану  $R_{plan}$ . Показник визначає ймовірність того, що фактичні витрати (або сумарний час виконання

маршруту з урахуванням затримок  $T$ ) не перевищать встановлений критичний поріг, визначений умовами контракту або бюджетом

$$R_{plan} = P(Z_{fact} \leq Z_{limit}), \quad (2.23)$$

де  $Z_{fact}$  – значення сумарної узагальненої вартості, реалізоване в окремому імітаційному сценарії, грн;

$Z_{limit}$  – максимально допустимий рівень сумарної узагальненої вартості (бюджетне обмеження), грн.

Даний показник є ключовим критерієм ефективності організації перевезень, оскільки він трансформує складні стохастичні процеси у зрозумілу для менеджменту ймовірність успішного завершення логістичного циклу.

3. Вартість робастності  $\Delta_{rob}$ . Цей показник кількісно визначає «ціну безпеки» логістичної системи – величину додаткових операційних витрат, на які свідомо йде перевізник для захисту від воєнних ризиків

$$\Delta_{rob} = \frac{\bar{Z}(\mathcal{E}_3 > 1) - \bar{Z}(\mathcal{E}_3 = 1)}{\bar{Z}(\mathcal{E}_3 = 1)} \cdot 100\%, \quad (3.24)$$

де  $\bar{Z}(\mathcal{E}_3 > 1)$  – середня сумарна узагальнена вартість за робастною моделлю (із застосуванням коефіцієнта критичності загрози), грн;

$\bar{Z}(\mathcal{E}_3 = 1)$  – середня сумарна узагальнена вартість за ідеальним (оптимістичним) планом без урахування «безпекового каркаса».

Даний показник дозволяє обґрунтувати раціональність переходу до дорожчих, але безпечніших маршрутів, наочно демонструючи співвідношення між зростанням витрат та підвищенням рівня надійності системи. Інтегроване використання зазначених показників дозволяє реалізувати механізм зворотного зв'язку в системі підтримки прийняття рішень. У разі, якщо значення  $R_{plan}$  виявляється нижчим за цільовий рівень, система ініціює коригування параметра  $\mathcal{E}_3$  на другому рівні моделювання, забезпечуючи

ітераційне формування максимально стійкої топології маршрутів для умов конкретного міста.

Ключовою особливістю розробленої тривірневої структури моделювання є наявність механізму інтерактивного зворотного зв'язку між етапом верифікації (Рівень 3) та етапом синтезу (Рівень 2). Даний механізм забезпечує динамічну адаптацію логістичного плану до встановлених вимог надійності шляхом ітераційного коригування стратегічного параметра – коефіцієнта критичності загрози  $\mathcal{E}_3$ . Логіка функціонування алгоритму зворотного зв'язку базується на принципі задоволення цільового рівня надійності при мінімізації «ціни стійкості». Процес реалізується за наступним алгоритмом.

Крок 1. Ініціалізація та встановлення граничних умов. На основі вимог замовника перевезень або внутрішніх стандартів логістичного оператора визначається мінімально допустимий поріг надійності  $R_{plan}^{target}$  (наприклад,  $R_{plan}^{target} = 0,9$ ). Початкове значення коефіцієнта критичності загрози встановлюється як  $\mathcal{E}_3 = 1$  (нейтралітет до ризику).

Крок 2. Синтез раціональної топології (Рівень 2). Виконується розв'язання задачі маршрутизації з поточною вагою воєнного ризику. Алгоритм формує Парето-оптимальне рішення  $X_i^*$ , яке за поточного  $\mathcal{E}_3$  забезпечує мінімальне значення узагальненої цільової функції  $Z$ .

Крок 3. Стохастична верифікація плану (Рівень 3). Сформований набір маршрутів  $X_i^*$  передається в імітаційну модель Монте-Карло. Проводиться серія з  $N$  ітерацій, де симулюються випадкові воєнні інциденти (блокування дуг) та часові затримки (повітряні тривоги). На основі результатів симуляції розраховується фактичний показник надійності  $R_{plan}$ .

Крок 4. Перевірка умови збіжності. Здійснюється порівняння отриманого показника з цільовим порогом. Якщо  $R_{plan} \geq R_{plan}^{target}$  поточна топологія визнається раціональною. Алгоритм завершує роботу, видаючи

фінальний «безпековий каркас» маршрутів. Якщо  $R_{plan} < R_{plan}^{target}$  то система констатує недостатній рівень робастності плану та переходе до Кроку 5.

Крок 5. Адаптивне коригування параметра  $\mathcal{E}_3$ . Коефіцієнт критичності загрози збільшується на встановлений крок адаптації  $\mathcal{E}_{3_{i+1}} = \mathcal{E}_{3_i} + \Delta\mathcal{E}$ . Збільшення  $\mathcal{E}_3$  призводить до штучного «здорожчання» ризикових ділянок у цільовій функції. Після коригування цикл повторюється, починаючи з Кроку 2, що змушує оптимізатор шукати більш захищені, хоча й довші траєкторії руху. Така ітераційна процедура дозволяє знайти точку «безпекового компромісу», де логістична система отримує необхідну стійкість до воєнних загроз при раціональному рівні операційних витрат. Наявність зворотного зв'язку перетворює статичне планування на процес адаптивного управління, що є критично важливим в умовах перманентної нестабільності міського середовища.

## 2.5 Висновок за розділом

Розгляд міської вантажної логістики як складної адаптивної системи дозволяє відійти від обмежених фрагментарних підходів на користь цілісного розуміння динаміки транспортних процесів. Встановлено, що в умовах високої щільності інформаційних та матеріальних потоків система демонструє властивості самоорганізації та нелінійності, що потребує впровадження гнучких методів регулювання замість жорсткого централізованого планування. Такий підхід забезпечує теоретичну базу для створення інструментів управління, здатних адаптуватися до постійних змін операційного середовища без втрати функціональної стійкості логістичної мережі.

Аналіз логістичних процесів в умовах воєнних загроз свідчить про необхідність фундаментального перегляду традиційних критеріїв ефективності, де на перший план виходять показники надійності та безпеки

перевезень. Встановлено, що інтеграція специфічних метрик, таких як індекси стійкості та ймовірності блокування маршрутів, дозволяє кількісно оцінити вплив зовнішніх дестабілізуючих факторів на результативність доставки. Це створює умови для переходу до стратегій управління, за яких пріоритетом стає не лише мінімізація прямих операційних витрат, а й гарантоване збереження активів системи під впливом екстремальних загроз.

Розроблений математичний апарат маршрутизації забезпечує інтеграцію воєнних ризиків як структурних параметрів цільової функції, що дозволяє формалізувати процес вибору раціональних траєкторій руху в нестабільному середовищі. Завдяки впровадженню параметра стратегічного застереження стає можливим регулювання рівня робастності плану залежно від поточної інтенсивності вогневого впливу та тривалості повітряних тривог. Застосований підхід дозволяє превентивно формувати маршрутні схеми, які оминають зони високої небезпеки та мінімізують очікувані втрати від системних простоїв і топологічних блокувань мережі.

Запропонована трирівнева ієрархічна структура моделювання забезпечує комплексне вирішення задачі організації перевезень в умовах перманентної нестабільності міського простору. Поєднання методів геопросторового аналізу, оптимізаційних метаевристик та імітаційного моделювання створює замкнений цикл формування та верифікації логістичних рішень. Використання механізмів адаптивного зворотного зв'язку дозволяє динамічно коригувати параметри планування для досягнення цільових показників надійності, що суттєво підвищує загальну життєздатність транспортної системи в екстремальних умовах.

## РОЗДІЛ 3

### АЛГОРИТМІЧНА ТА ПРОГРАМНА РЕАЛІЗАЦІЯ МОДЕЛІ ОПТИМІЗАЦІЇ МАРШРУТІВ В УМОВАХ ВОЄННИХ РИЗИКІВ

3.1 Симуляційно-евристичний алгоритм для синтезу раціональної топології маршрутів

Центральною проблемою при реалізації розробленої математичної моделі є аналітична нерозв'язність цільової функції через надзвичайно велику потужність простору сценаріїв воєнних загроз. Кожен окремий сценарій у моделі являє собою унікальну комбінацію стохастичних реалізацій тривалості повітряних тривог та випадкових блокувань сегментів дорожньої мережі. Застосування точних методів оптимізації в таких умовах є обчислювально неможливим, що зумовлює вибір симуляційно-евристичного підходу як найбільш адекватної парадигми для синтезу робастних рішень.

Ця методологія дозволяє поєднати потужність метаевристичних алгоритмів у дослідженні комбінаторних просторів із точністю імітаційного моделювання для оцінки якості маршрутів в умовах невизначеності.

Архітектура запропонованого алгоритму базується на дворівневому контурі управління, де генетичний алгоритм виступає як зовнішній оптимізаційний механізм, а модуль Монте-Карло – як внутрішній оціночний інструмент. На першому етапі алгоритм генерує популяцію кандидатних рішень, що представляють різні варіанти топології маршрутів. Кожне рішення передається до імітаційного модуля, який проводить серію з  $N$  незалежних ітерацій (сценаріїв). У кожному сценарії симулюється Пуассонівський процес виникнення тривог та ймовірнісний стан дорожнього графа, що дозволяє розрахувати математичне очікування сумарної узагальненої вартості. Саме це середнє значення стає показником пристосованості, на основі якого здійснюється подальша селекція та еволюція популяції. Процес синтезу раціональної топології безпосередньо керується «коефіцієнтом критичності

загрози»  $\mathcal{E}_3$ , який виступає стратегічним детермінантом безпеки у системі. При значеннях  $\mathcal{E}_3 > 1$  алгоритм переходить у ризико-аверсивний режим, штучно збільшуючи вагу небезпечних ділянок у цільовій функції. Це змушує оптимізатор відхилятися від найкоротших шляхів на користь довших, але безпечніших сегментів, формуючи таким чином «безпековий каркас» логістичної мережі. Такий підхід дозволяє превентивно адаптувати структуру маршрутів до воєнних загроз ще на етапі планування, не чекаючи виникнення реального збою в операційному середовищі.

Для забезпечення робастності кінцевого плану алгоритм реалізує механізм адаптивного зворотного зв'язку між етапами синтезу та верифікації. Якщо за результатами імітації сформована топологія демонструє індекс надійності нижчий за встановлений поріг, система ініціює ітераційне збільшення  $\mathcal{E}_3$ . Це триває до моменту знаходження такої конфігурації маршрутів, де неможливо покращити показник безпеки без критичного зростання операційних витрат, що відповідає точці компромісу на фронті Парето. У підсумку, такий симуляційно-евристичний цикл перетворює теоретичну математичну модель на динамічну систему підтримки прийняття рішень, здатну генерувати життєздатні плани в умовах перманентної нестабільності міського середовища.

Для успішної реалізації симуляційно-евристичного алгоритму та забезпечення адекватності результатів моделювання необхідно чітко структурувати масиви вхідних даних. Відповідно до обраної стратегії робастної оптимізації, вхідна інформація поділяється на статичні параметри логістичної системи та стохастичні параметри воєнного середовища.

Особливістю моделі є перехід до детермінованого попиту, що дозволяє зосередити обчислювальний ресурс алгоритму на опрацюванні воєнних ризиків як домінуючого фактора нестабільності.

Підготовка вхідних даних передбачає синтез інформації з трьох функціональних блоків, геопросторового, експлуатаційного та статистично-безпекового.

На основі дорожнього графа міста формується матриця найкоротших відстаней та розраховуються показники критичності кожної дуги через вартість потенційного об'їзду. Це дозволяє моделі превентивно оцінювати «географічну вразливість» маршруту.

Для кожного типу ТЗ у гетерогенному парку фіксуються технічні ліміти (вантажність, швидкість) та питомі витрати. Попит клієнтів у даній моделі приймається детермінованим, що відповідає умовам оперативного планування на основі підтверджених замовлень.

Параметри воєнних загроз є найбільш динамічним блоком даних, що базується на ретроспективному аналізі інтенсивності повітряних тривог та просторовому розподілі влучних ударів. За допомогою методів ядерного згладжування (KDE) ці дані трансформуються у ймовірнісні характеристики блокування ділянок дорожньої мережі.

Якість синтезованої раціональної топології маршрутів безпосередньо залежить від достовірності та повноти вхідної інформації. Дорожня мережа міста Харків моделюється у формі орієнтованого графа, де кожна дуга містить не лише фізичні характеристики (довжина, середня швидкість, а й аналітичний показник вартості об'їзду. Розрахунок  $\Delta_{ij}$  здійснюється превентивно для кожного сегмента мережі за допомогою алгоритму Дейкстри. Даний параметр дозволяє моделі кількісно оцінити «стратегічну вартість» кожної вулиці. Наприклад, блокування мостів або магістралей з обмеженою кількістю альтернативних шляхів призводить до різкого зростання  $\Delta_{ij}$ , що автоматично робить такі ділянки критичними для «безпекового каркаса».

Експлуатаційно-економічні детермінанти визначають технічні можливості автопарку з фінансовими показниками діяльності перевізника. На відміну від класичних моделей зі стохастичним попитом, у даному дослідженні обсяг замовлення вважається відомим на момент запуску алгоритму. Це дозволяє усунути «шум» комерційної невизначеності та зосередити обчислювальну потужність моделі на опрацюванні воєнних загроз. Вартість простою включає погодинні витрати на оплату праці екіпажу та

амортизаційні відрахування, що накопичуються під час дії сигналів «Повітряна тривога». Монетизація часу очікування забезпечує адитивність темпоральних ризиків у загальній цільовій функції. Характеристика вхідних даних та джерела їх отримання представлені в таблиці 3.1.

Таблиця 3.1 – Характеристика вхідних даних та джерела їх отримання

Категорія даних	Найменування показника та позначення	Тип даних	Джерела отримання інформації
Параметри мережі	Дорожній граф, матриця найкоротших відстаней	Об'єктний граф, матриця	ГІС-платформи, Google Maps API, дані логістичного відділу
Параметри парку транспортних засобів	Вантажність, технічна швидкість	Числовий	Технічні паспорти ТЗ, дані систем GPS-моніторингу підприємства
Експлуатаційні параметри	Питомий попит клієнтів (детермінований)	Числовий	Бази даних замовлень, ТТН
Воєнні ризики (темпоральні)	Інтенсивність тривоги, очікувана тривалість	Статистичні параметри	Офіційні канали сповіщень (ДСНС), моніторингові сервіси статистики тривоги
Воєнні ризики (топологічні)	Ймовірність блокування дуги, витрати на об'їзд	Числовий (0..1), грошовий	ГІС-аналіз (KDE) точок інцидентів, розрахунок альтернативних шляхів у ГІС
Економічні параметри	Питомі витрати, вартість простою	Грошовий	Бухгалтерська звітність, ринкові тарифи на ПММ, зарплатні відомості

Стохастичні параметри воєнного середовища це найбільш динамічна частина вхідних даних, що потребує постійного оновлення через офіційні моніторингові джерела. Інтенсивність повітряних тривоги та їх очікувана тривалість розраховуються на основі ретроспективного статистичного аналізу

(за останні 3–6 місяців для конкретного регіону). Це дозволяє моделювати «час експозиції» ризику для кожного маршруту.

Ймовірність блокування дуги через кінетичний удар визначається через функцію просторової інтенсивності, побудовану за методом ядерного згладжування (KDE) точок влучань. Параметризація радіуса згладжування у межах 200 – 500 метрів дозволяє врахувати не лише пряме влучання, а й зони оточення та перекриття руху спецтехнікою ДСНС.

Коефіцієнт критичності загрози, як стратегічний вхідний параметр, не є результатом збору даних, а встановлюється суб'єктом управління як рівень «ризико-аверсивності» системи. Він виступає ваговим коефіцієнтом, що масштабує вартість ризику відносно прямих операційних витрат, дозволяючи логісту моделювати різні сценарії – від «економічно агресивного» до «максимально захищеного».

Для практичної реалізації розробленої математичної моделі та забезпечення стабільної збіжності обчислювального процесу проведено детальну специфікацію внутрішніх параметрів генетичного алгоритму. Оскільки задача маршрутизації транспортних засобів в умовах воєнного стану характеризується високою NP-складністю та стохастичністю цільової функції, вибір генетичних операторів спрямований на збереження топологічно стійких сегментів «безпекового каркаса» під час еволюційного пошуку.

Вибір типу кодування хромосом є першим етапом специфікації, оскільки він визначає спосіб представлення логістичних рішень у пам'яті комп'ютера. У даному дослідженні використано перестановочне кодування, де кожна особина популяції являє собою впорядкований вектор індексів клієнтів. Спеціальний символ-роздільник (індекс пункту навантаження) дозволяє динамічно розбивати загальну послідовність на окремі рейси для гетерогенного парку транспортних засобів, враховуючи їхні обмеження щодо вантажності.

Ефективність дослідження простору рішень забезпечується через застосування спеціалізованих генетичних операторів, що адаптовані до

структури транспортного графа. Для схрещування обрано оператор часткового відображення (Partially Mapped Crossover – PMX), який дозволяє нащадкам успадковувати відносний порядок відвідування вузлів від обох батьківських особин, мінімізуючи при цьому ймовірність появи некоректних маршрутів.

Процес мутації реалізується через комбінацію операторів Swap (випадковий обмін позиціями двох клієнтів) та Inversion (інвертування послідовності на випадковій ділянці), що забезпечує необхідний рівень генетичного різноманіття та запобігає передчасному збігу алгоритму до локальних оптимумів.

Стратегія селекції в алгоритмі базується на принципах турнірного відбору, що доповнюється механізмом елітизму для збереження найкращих знайдених рішень. Турнірна селекція передбачає вибір кількох особин, серед яких право на репродукцію отримує та, що демонструє мінімальне значення сумарної узагальненої вартості з урахуванням воєнних ризиків. Принцип елітизму гарантує безпосереднє перенесення певної частки найбільш пристосованих особин у наступне покоління без змін, що забезпечує монотонне покращення показника цільової функції впродовж усього процесу оптимізації.

Для проведення чисельних експериментів та верифікації моделі встановлено систему базових числових параметрів, що забезпечують баланс між точністю оцінки та часом виконання алгоритму (табл. 3.2). Особливе значення має кількість ітерацій методу Монте-Карло ( $N = 1000$ ), що використовується для статистично значущої оцінки очікуваних втрат від повітряних тривог та блокувань дорожньої мережі для кожної особини в популяції. Представлена специфікація параметрів дозволяє алгоритму ефективно досліджувати простір рішень, покращуючи показники робастності плану.

Таблиця 3.2 – Технічні параметри функціонування генетичного алгоритму

Назва параметра алгоритму	Функціональний опис та роль у моделі	Рекомендоване значення
Загальний обсяг популяції	Визначає кількість варіантів планів маршрутів, що одночасно перебувають у процесі еволюції	100 одиниць
Максимальна кількість поколінь	Встановлює ліміт ітерацій для пошуку раціональної топології маршрутів	500 одиниць
Тип процедури селекції	Визначає спосіб вибору батьківських особин для створення наступного покоління	Турнірний вибір (5 одиниць)
Коефіцієнт збереження найкращих рішень	Частка найбільш пристосованих особин, що переходять у наступне покоління без змін	2 %
Ймовірність операції схрещування	Частота обміну генетичною інформацією між батьківськими планами маршрутів	0,90
Ймовірність операції мутації	Частота внесення випадкових змін у структуру маршруту для уникнення локальних оптимумів	0,08
Кількість ітерацій моделювання Монте-Карло	Кількість випадкових сценаріїв воєнних загроз для оцінки стійкості кожної особини	1000 сценаріїв

Використання вказаних налаштувань забезпечує формування раціональної топології маршрутів, де кожне рішення є збалансованим за критерієм сумарної узагальненої вартості та безпеки залежно від стратегічного пріоритету, визначеного коефіцієнтом критичності загрози.

Для забезпечення технічної прозорості та можливості програмної реалізації розробленої методики проведено формалізацію симуляційно-евристичного циклу. Представлений алгоритм відображає дворівневу архітектуру управління, де зовнішній цикл відповідає за еволюційний пошук раціональної топології маршрутів, а внутрішній оціночний модуль виконує стохастичну верифікацію кожної особини на основі методу Монте-Карло. Ключовою особливістю даної реалізації є інтеграція коефіцієнта критичності

загрози безпосередньо у процес розрахунку показника пристосованості, що дозволяє алгоритму орієнтуватися на формування безпечного каркаса логістичної мережі. Основну логіку функціонування симуляційно-евристичного рушія представлено на рисунку 3.1.

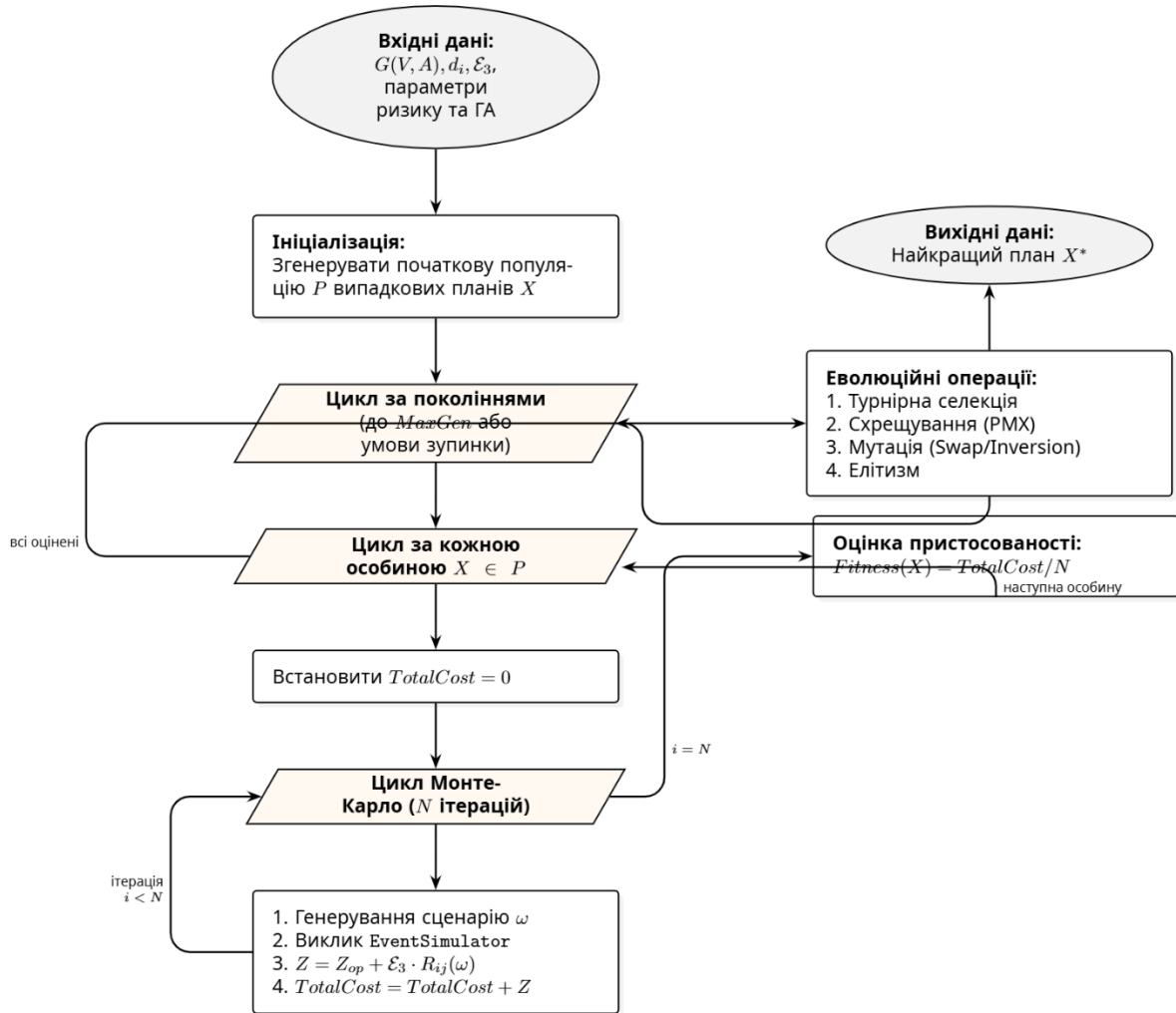


Рисунок 3.1 – Блок-схема алгоритму синтезу робастних маршрутів на основі симуляційно-евристичного підходу

### 3.2 Програмна реалізація алгоритму вибору безпечних маршрутів

Програмний комплекс для реалізації запропонованих методів розроблено мовою програмування Python, що обумовлено її гнучкістю та наявністю потужних бібліотек для наукових обчислень і геопросторового

аналізу. Використання Python дозволяє інтегрувати складні математичні моделі з інструментами обробки даних у реальному часі, що є критично важливим для логістики в умовах воєнних загроз.

Програма побудована на базі об'єктно-орієнтованого підходу, що забезпечує модульність системи та можливість її масштабування. Ключовими бібліотеками, що забезпечують обчислювальну потужність комплексу, є – NumPy та Pandas: для високошвидкісної обробки матриць відстаней та великих масивів даних про воєнні інциденти. SciPy: для моделювання стохастичних процесів, зокрема Пуассонівських потоків повітряних тривог. Matplotlib та Seaborn: для візуалізації «безпекового каркаса» та теплових карт ризиків на графі міста.

Перехід від класичних статичних методів до динамічного адаптивного управління вимагає впровадження гнучких алгоритмів, здатних опрацьовувати значні обсяги стохастичних даних у реальному часі. Програмна реалізація базується на гібридному алгоритмі адаптивного пошуку у великих містах (ALNS), який інтегрується з модулем імітаційного моделювання Монте-Карло для оцінки робастності рішень.

Основна ідея реалізованого ALNS-рушія полягає в ітераційному покращенні поточного плану перевезень шляхом застосування набору операторів руйнування («Destroy») та відновлення («Repair»). Програма автоматично обирає найбільш ефективні пари евристик на основі їхньої успішності в попередніх циклах, що дозволяє системі самостійно адаптуватися до поточної топології воєнних загроз.

Для забезпечення безпеки перевезень у логіку вибору евристик інтегровано коефіцієнт критичності загрози. Це дозволяє програмі не просто мінімізувати відстань, а цілеспрямовано «руйнувати» ті частини маршруту, що проходять через зони з високим показником  $R_j$ . Класифікація реалізованих евристик представлена у таблиці 3.3.

Таблиця 3.3 – Класифікація реалізованих евристик

Тип оператора	Назва евристики	Опис логіки в програмному кодi
Destroy (Руйнування)	Risk-Based Removal	Видаляє з маршруту клієнтів, під'їзд до яких пов'язаний з максимальним значенням інтегрованого воєнного ризику
	Shaw Removal	Видаляє групу клієнтів, що знаходяться в одному небезпечному районі (зоні вразливості)
	Random Removal	Забезпечує стохастичність пошуку для уникнення локальних оптимумів
Repair (Відновлення)	Safety-First Insertion	Вставляє видалені вузли в маршрути через дуги, що складають «безпековий каркас» мережі
	Regret-2 Insertion	Обирає клієнта, для якого різниця між найкращою та другою найкращою позицією вставки є максимальною, враховуючи штрафи за ризик

Для забезпечення відтворюваності результатів дослідження та практичного впровадження розробленого симуляційно-евристичного алгоритму необхідно чітко визначити параметри операційного середовища. Специфікація вимог дозволяє оцінити обчислювальну складність запропонованих методів та встановити межі масштабованості системи при збільшенні кількості вузлів логістичної мережі.

Враховуючи, що алгоритм адаптивного пошуку (ALNS) та модуль імітаційного моделювання Монте-Карло потребують проведення значної кількості ітераційних розрахунків ( $N=1000$  для кожної особини в популяції), особлива увага приділяється потужності центрального процесора та обсягу оперативної пам'яті.

Оперативна пам'ять є критичним ресурсом при обробці великих матриць найкоротших відстаней та матриць інтегрованого воєнного ризику, потужність яких зростає пропорційно  $n^2$ , де  $n$  – кількість пунктів доставки вантажу. Мінімальні та рекомендовані апаратні вимоги до робочої станції або сервера представлені в таблиці 3.4.

Таблиця 3.4 – Мінімальні та рекомендовані апаратні вимоги до робочої станції або сервера

Компонент	Мінімальні вимоги	Рекомендовані вимоги
Центральний процесор (CPU)	Intel Core i5 / AMD Ryzen 5 (4 ядра)	Intel Core i7 / AMD Ryzen 7 (8+ ядер) з підтримкою багатопотоковості
Оперативна пам'ять (RAM)	8 ГБ (для мереж до 100 вузлів)	16 – 32 ГБ (для складних міських агломерацій та $n > 500$ )
Накопичувач (SSD)	500 МБ вільного місця	2 ГБ (з урахуванням кешування ГІС-даних)
Відеоадаптер (GPU)	Інтегрований	Дискретний (для прискорення візуалізації теплових карт ризиків)

Програмна реалізація комплексу виконана мовою Python версії 3.10 або вище. Вибір даної версії обумовлений покращеною продуктивністю інтерпретатора та підтримкою сучасних типів анотацій, що підвищує стабільність об'єктно-орієнтованої архітектури системи.

Програмні залежності та бібліотеки – NumPy (1.23+) – для оптимізованих операцій над матрицями відстаней та ризиків. Pandas (1.5+) – для структурування баз даних замовлень та журналів воєнних інцидентів. SciPy – для моделювання Пуассонівських процесів повітряних тривог. Georandas & Sharply – для обробки просторових координат вузлів та дуг графа.

Особливістю розробленого комплексу є його відкритість до зовнішніх джерел даних, що забезпечує актуальність «безпекового каркаса» маршрутів. Програма підтримує інтеграцію з ГІС-сервісами через відповідні API-інтерфейси – Google Maps API / OpenStreetMap (OSM), використовується для отримання актуальних графів дорожньої мережі міста. Це дозволяє враховувати не лише топологічну відстань, а й реальну конфігурацію вулиць, наявність одностороннього руху та актуальні швидкісні обмеження.

Overpass API – забезпечує вилучення специфічних об'єктів міської інфраструктури (мостів, естакад), що є критично важливими при розрахунку витрат на об'їзд  $\Delta_{ij}$  у разі їх руйнування.

Модуль інтеграції зі статистикою загроз – реалізовано механізм імпорту даних про повітряні тривоги та воєнні інциденти у форматах JSON/CSV, що дозволяє динамічно оновлювати параметри інтенсивності  $\lambda$  та тривалості затримок.

Специфікація апаратних та системних вимог підтверджує можливість розгортання програмного комплексу на стандартному комп'ютерному обладнанні логістичних підприємств, забезпечуючи при цьому високу швидкість адаптації маршрутів до критичних змін у безпековому середовищі міста.

Для забезпечення високого рівня автономності та можливості паралельного тестування різних стратегій, програмний комплекс декомпоновано на спеціалізовані класи. Кожен клас інкапсулює специфічну логіку математичної моделі, що дозволяє виконувати глибоку параметризацію без зміни загальної архітектури системи.

Модуль просторового аналізу – клас RiskTopologyEngine, цей клас відповідає за формування цифрової моделі середовища загроз. Він виконує роль прошарку між первинними геопросторовими даними та оптимізаційним рушієм. Ключовою особливістю класу є метод розрахунку ядерного згладжування, який перетворює дискретні координати інцидентів у безперервне поле воєнного ризику. Специфікація атрибутів та методів класу RiskTopologyEngine представлена в таблиці 3.5.

Оптимізаційний рушій – клас ALNSOptimizer, на відміну від загального опису ALNS, клас ALNSOptimizer реалізує конкретний механізм управління ваговими коефіцієнтами евристик. Він автоматично відстежує успішність кожної пари «Destroy-Repair» операторів та адаптує їхню ймовірність вибору на основі отриманих результатів у попередніх ітераціях. Логіка управління станом у класі ALNSOptimizer представлена у таблиці 3.6.

Таблиця 3.5 – Специфікація атрибутів та методів класу RiskTopologyEngine

Елемент класу	Тип / Назва	Функціональне призначення
Атрибути	incident_layer	Векторний масив координат точок влучань та їх інтенсивності
	bandwidth_h	Параметр радіуса згладжування для методу KDE (рекомендовано 200–500 м)
Методи	generate_risk_surface()	Побудова растрової карти щільності загроз на основі Гауссового ядра
	integrate_edge_risk()	Розрахунок інтегрованої ймовірності блокування дуги через накладання графа на растр
	get_safety_skeleton()	Фільтрація дуг графа для формування «безпечного каркаса» мережі

Таблиця 3.6 – Логіка управління станом у класі ALNSOptimizer

Метод класу	Логіка функціонування	Параметри адаптації
update_scores()	Нарахування балів евристиці, +15 за нове найкраще рішення, +10 за покращення, +5 за прийнятне рішення	накопичений бал евристики
recalculate_weights()	Динамічне оновлення ймовірності вибору операторів для наступного сегмента ітерацій	вага евристики
apply_risk_penalty()	Інтеграція коефіцієнта у цільову функцію для кожної ітерації руйнування маршруту	коефіцієнт критичності

Модуль верифікації – клас EventSimulator. Клас EventSimulator є ядром імітаційного моделювання. Він не просто розраховує витрати, а генерує стохастичне операційне середовище, у якому знаходиться створений план перевезень. Клас імплементує апарат Пуассонівських потоків для моделювання раптових тривог та виникнення нових заторів. Технічна структура імітаційного циклу у EventSimulator:

- генерація сценарію, метод `spawn_scenario()` створює випадкову реалізацію часу тривоги та стану дорожньої мережі (блокування);
- прогін маршрутів, метод `execute_simulation()` проводить ТЗ по дугах графа, фіксуючи фактичні витрати та затримки;
- статистична агрегація, після завершення  $N$  прогонів, метод `get_resilience_metrics()` розраховує індекс надійності.

Програмний комплекс для синтезу робастних маршрутів у міських логістичних системах реалізовано за модульним принципом з використанням парадигми об'єктно-орієнтованого програмування. Представлена структурно-логічна схема (рис. 3.2) відображає ієрархію взаємодії основних функціональних модулів, що забезпечують реалізацію запропонованого симуляційно-евристичного алгоритму.

Архітектура комплексу розділена на чотири логічні рівні – рівень інтерфейсу користувача (GUI), рівень управління даними, обчислювальне ядро та рівень звітності. Рівень інтерфейсу користувача представлений класом «ГоловнийІнтерфейс» (GUI), який виконує роль координатора взаємодії між користувачем (логістом) та обчислювальною системою. Через спеціалізовані модулі (вкладки «Автомобілі», «Пункти та відстані», «Аналіз ризиків») здійснюється замовлення параметрів транспортної мережі та налаштування параметрів стохастичного моделювання. Основною функцією цього рівня є валідація вхідних даних та передача керуючих команд до менеджера даних.

Рівень управління даними базується на класі «МенеджерЛогістичнихДаних». Він відповідає за структурування інформації про парк транспортних засобів (`List<Vehicle>`) та формування матриць відстаней і витрат. Особливістю цього модуля є використання бібліотек високопродуктивних обчислень (`NumPy`, `Pandas`), що дозволяє ефективно обробляти великі масиви даних (`ndarray`) для міських мереж значної розмірності (на прикладі дорожнього графа м. Харків).

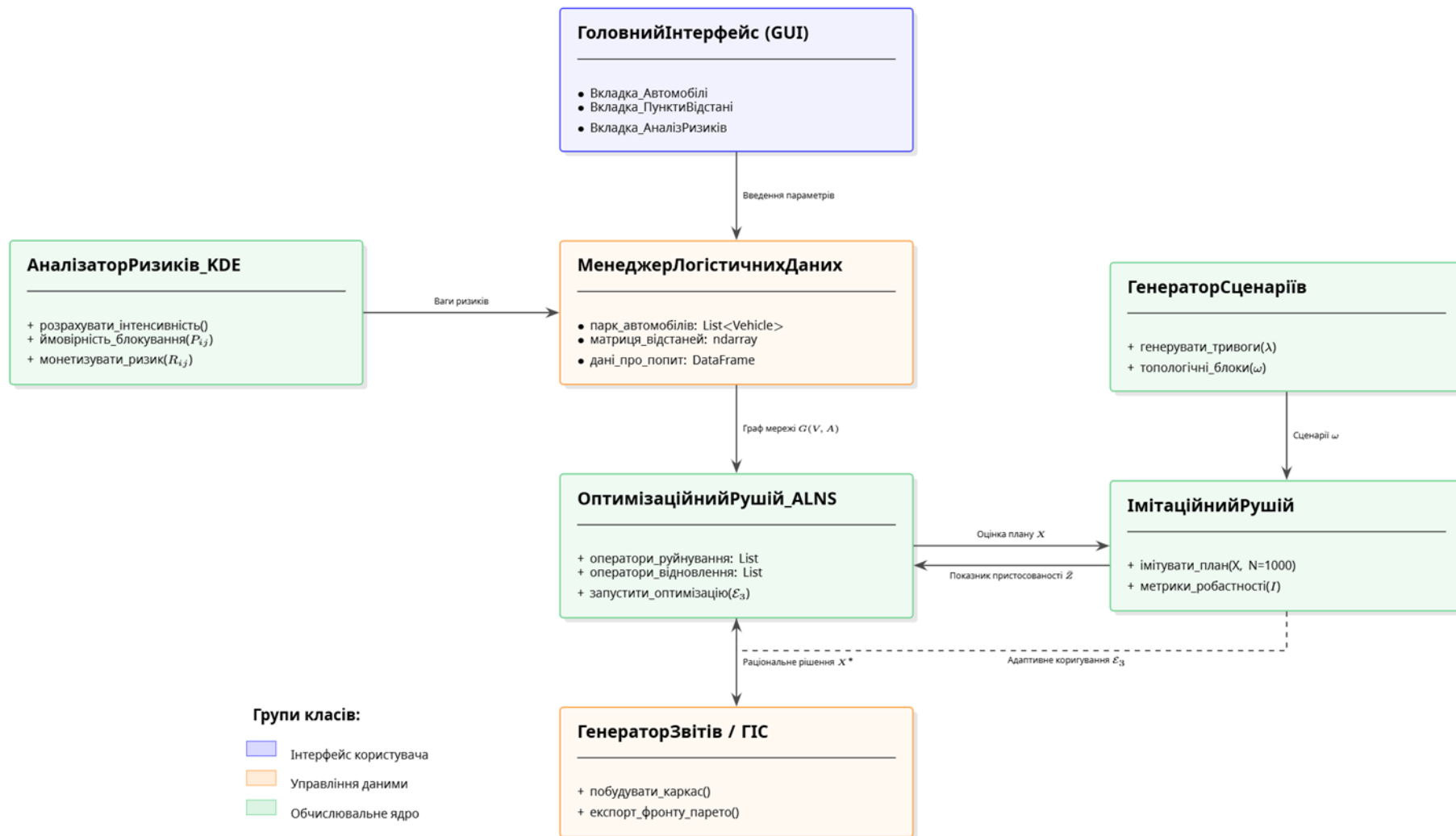


Рисунок 3.2 – Структурно-логічна схема взаємодії класів програмного комплексу для синтезу робастних маршрутів

Обчислювальне ядро є найбільш наукоємною частиною комплексу та включає чотири взаємопов'язані класи – «Аналізатор Ризиків KDE» реалізує розроблений метод ядерного згладжування інцидентів. Він обчислює просторову інтенсивність воєнних загроз та трансформує їх у ймовірнісні показники блокування дуг і відповідні ваги ризику. Отримані значення інтегруються в граф мережі, що зберігається в менеджері даних. «Оптимізаційний Рушій ALNS» виконує пошук раціональних топологій маршрутів. Клас реалізує механізми адаптивного пошуку у великих масивах (ALNS) через набір операторів руйнування та відновлення. Процес оптимізації безпосередньо залежить від коефіцієнта аверсії до ризику, який передається з інтерфейсу.

«Імітаційний Рушій» та «Генератор Сценаріїв» утворюють блок верифікації рішень методом Монте-Карло. Клас «Генератор Сценаріїв» на основі пуассонівського процесу моделює випадкові часові інтервали воєнних загроз (тривоги), а «Імітаційний Рушій» проводить випробування кожного знайденого плану на множині  $N=1000$  сценаріїв. Результатом взаємодії є розрахунок математичного очікування сумарної узагальненої вартості та інтегрального показника робастності.

Логіка взаємодії компонентів реалізує замкнений цикл симуляційно-евристичного моделювання. Оптимізаційний рушій ALNS генерує кандидата на раціональне рішення та передає його до імітаційного рушія для оцінки в умовах стохастичного середовища. Після завершення імітації показник пристосованості повертається до оптимізатора. Важливою особливістю архітектури є наявність адаптивного зворотного зв'язку (позначено пунктирною лінією) – якщо за результатами імітації рівень робастності плану нижче критичного значення, система автоматично ініціює корегування коефіцієнта  $\mathcal{E}_3$  та повторний цикл оптимізації.

Фінальна стадія роботи комплексу забезпечується класом «Генератор Звітів/ГІС», який візуалізує синтезований «безпековий каркас» логістичної мережі та експортує результати у вигляді фронту Парето, що

дозволяє ОПР прийняти остаточне рішення щодо вибору стратегії доставки. Така структура програмного комплексу забезпечує високу гнучкість при зміні параметрів інтенсивності воєнних загроз та дозволяє проводити багатоваріантні розрахунки з високим ступенем достовірності результатів.

### 3.3 Опис функціоналу та сценаріїв роботи з програмним комплексом

Розроблений програмний комплекс є спеціалізованою системою підтримки прийняття рішень (СППР), призначеною для вирішення задач оперативного планування маршрутів доставки вантажів у міських агломераціях. Ключовою особливістю системи є її адаптація до функціонування в умовах високого рівня невизначеності, зокрема в середовищі з перманентними воєнними загрозами. Програма є практичною імплементацією математичної моделі, що поєднує класичні задачі комбінаторної оптимізації з елементами стохастичного програмування, тим самим долаючи розрив між теоретичними дослідженнями операцій та прикладними потребами логістичних підприємств, що функціонують в екстремальних умовах. Основне призначення комплексу полягає у наданні інструментарію для формування таких планів перевезень, які є не лише оптимальними з точки зору мінімізації операційних витрат, але й стійкими та робастними до дестабілізуючих факторів безпекового характеру.

Функціональна архітектура програми побудована за модульним принципом, де кожен модуль відповідає за окремий етап процесу планування, від введення вихідних даних до аналізу кінцевих результатів. Графічний інтерфейс користувача реалізований у вигляді п'яти логічно пов'язаних вкладок, що забезпечує послідовний та інтуїтивно зрозумілий робочий процес.

Перша вкладка, «Автомобілі», слугує для конфігурації доступних ресурсів. У цьому модулі користувач визначає параметри гетерогенного парку транспортних засобів, вводячи для кожної одиниці її техніко-економічні характеристики, такі як вантажність, швидкість, а також функції витрат –

постійні (годинні) та змінні (залежні від пробігу). Додатково тут задаються глобальні економічні константи, зокрема вартість години простою та штрафи за затримки, які використовуються у класичній моделі розрахунку витрат (рис. 3.3).

Файл Розв'язати

Автомобілі Пункти та відстані Маршрути Результати Аналіз Військових Ризиків

Кількість автомобілів: 10 Штраф за годину затримки автомобіля, грн./год.: 200 Тарифна ставка роботи вантажника, грн./год.: 100

Марка автомобіля	Номінальна вантажність, (т)	Технічна швидкість, (км/год)	Постійні витрати (грн/год)	Змінні витрати (грн/км)
YUEIN 1080	5,5	30	55	8
Mercedes-Benz Atego 816	5	28	50	7,5
Isuzu NKR 77	3	25	30	4,5
Foton BJ5049V9BEA	3	26	30	4,5
Isuzu QLS100XTMAR	5	29	50	7,5
Foton BJ5121VHCFK	6,5	28	65	9,75
Hyundai HD 120 Long/Extra	6	31	60	9
Hyundai HD 65	3,5	25	35	5,25
Hyundai HD 78 Short/Long	4	27	40	6
Foton AUMARK C	4,5	28	45	7

Рисунок 3.3 – Інтерфейс розробленого програмного комплексу, вкладка «Автомобілі»

Друга вкладка, «Пункти та відстані», призначена для визначення топології логістичної мережі та параметрів попиту. Користувач задає кількість пунктів доставки, що ініціює створення двох табличних форм – матриці попиту клієнтів та симетричної матриці найкоротших відстаней між усіма вузлами мережі, включаючи центральний склад (пункт навантаження) (рис. 3.4). Ці дані формують опис зваженого графу, на якому вирішується задача маршрутизації.

Автомобілі Пункти та відстані Маршрути Результати Аналіз Військових Ризиків

Кількість пунктів: 10 (DM - матриця відстаней)

Точка	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
Запит	0,3	0,5	1,5	2,3	2,2	0,8	1,9	2,5	1,3	0,7	
DM	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
0	0	10,5	23,7	15,8	17	12,3	9,2	11,3	4,8	19,5	13,3
1	10,5	0	5	21,1	7,8	9,1	4,3	27,4	29,3	22,7	11,5
2	23,7	5	0	15,6	17,2	14,1	30	12,9	10,4	8,5	26,5
3	15,8	21,1	15,6	0	14,6	28,9	22	14,7	18,6	25	11,9
4	17	7,8	17,2	14,6	0	14,8	26,6	27,2	15	9,2	17,5
5	12,3	9,1	14,1	28,9	14,8	0	28,2	9,3	5,1	12,7	18,8
6	9,2	4,3	30	22	26,6	28,2	0	12,3	16,8	26,2	22,2
7	11,3	27,4	12,9	14,7	27,2	9,3	12,3	0	19,3	13,5	25,6
8	4,8	29,3	10,4	18,6	15	5,1	16,8	19,3	0	29,3	27,5
9	19,5	22,7	8,5	25	9,2	12,7	26,2	13,5	29,3	0	30
10	13,3	11,5	26,5	11,9	17,5	18,8	22,2	25,6	27,5	30	0

Рисунок 3.4 – Інтерфейс розробленого програмного комплексу, вкладка «Пункти та відстані»

Третя вкладка, «Маршрути», є модулем виведення результатів детерміністичної оптимізації. Після виконання розрахунків у цій вкладці для кожного задіяного автомобіля візуалізується набір згенерованих маршрутів. Для кожного маршруту розраховуються та відображаються ключові показники ефективності, такі як коефіцієнт використання пробігу, коефіцієнт використання вантажності, а також підсумкові операційні витрати, розраховані за класичною моделлю (рис. 3.5).

Автомобіль	Пункти та відстані	Маршрути	Результати	Аналіз Військових Ризиків	
Автомобіль	Маршрути	Коефіцієнт використання пробігу	Коефіцієнт використання вантажності	Фактичний час навантаження-розвантаження	Витрати на доставку, грн.
YUEIN 1080	0-9-2-1-4-0	0.37	0.80	0.71	783.23
YUEIN 1080	0-8-3-10-0	0.63	0.85	0.75	666.15
YUEIN 1080	0-7-5-6-0	0.65	0.89	0.79	773.92
Mercedes-Benz Atego 816	0-9-2-1-4-0	0.37	0.88	РАЗОМ:	2 223.30
Mercedes-Benz Atego 816	0-8-3-10-0	0.63	0.94	0.73	758.62
Mercedes-Benz Atego 816	0-7-5-6-0	0.65	0.98	0.78	644.36
				0.82	747.71
				РАЗОМ:	2 150.69
Isuzu NKR 77	0-6-1-2-9-0	0.38	0.97	0.61	443.53
Isuzu NKR 77	0-3-10-0	0.29	0.73	0.46	336.17
Isuzu NKR 77	0-4-0	0.00	0.77	0.49	273.29
Isuzu NKR 77	0-5-0	0.00	0.73	0.46	215.08
Isuzu NKR 77	0-7-0	0.00	0.63	0.40	194.02
Isuzu NKR 77	0-8-0	0.00	0.83	0.53	132.45
				РАЗОМ:	1 596.62
Foton BJ5049V9BEA	0-6-1-2-9-0	0.38	0.97	0.61	438.52
Foton BJ5049V9BEA	0-3-10-0	0.29	0.73	0.46	333.01
Foton BJ5049V9BEA	0-4-0	0.00	0.77	0.49	273.29
Foton BJ5049V9BEA	0-5-0	0.00	0.73	0.46	213.57
Foton BJ5049V9BEA	0-7-0	0.00	0.63	0.40	192.62
Foton BJ5049V9BEA	0-8-0	0.00	0.83	0.53	131.86
				РАЗОМ:	1 582.87

Рисунок 3.5 – Інтерфейс розробленого програмного комплексу, вкладка «Маршрути»

Четверта вкладка «Результати» забезпечує представлення оптимального плану перевезень у вигляді детального операційного графіка. Система автоматично обирає план, розроблений для найбільш економічно ефективного автомобіля, та представляє його у вигляді часової шкали. Цей модуль візуалізує послідовність рейсів, вказуючи час виїзду з навантажувального пункту, прогнозований час прибуття до кожного клієнта та час повернення на базу, що дозволяє отримати готовий до виконання план-графік.

П'ята вкладка, «Аналіз воєнних Ризиків», є центральним інноваційним модулем програми. Вона призначена для кількісної оцінки впливу безпекових факторів на вартість перевезень. Функціонально вона складається з двох блоків.

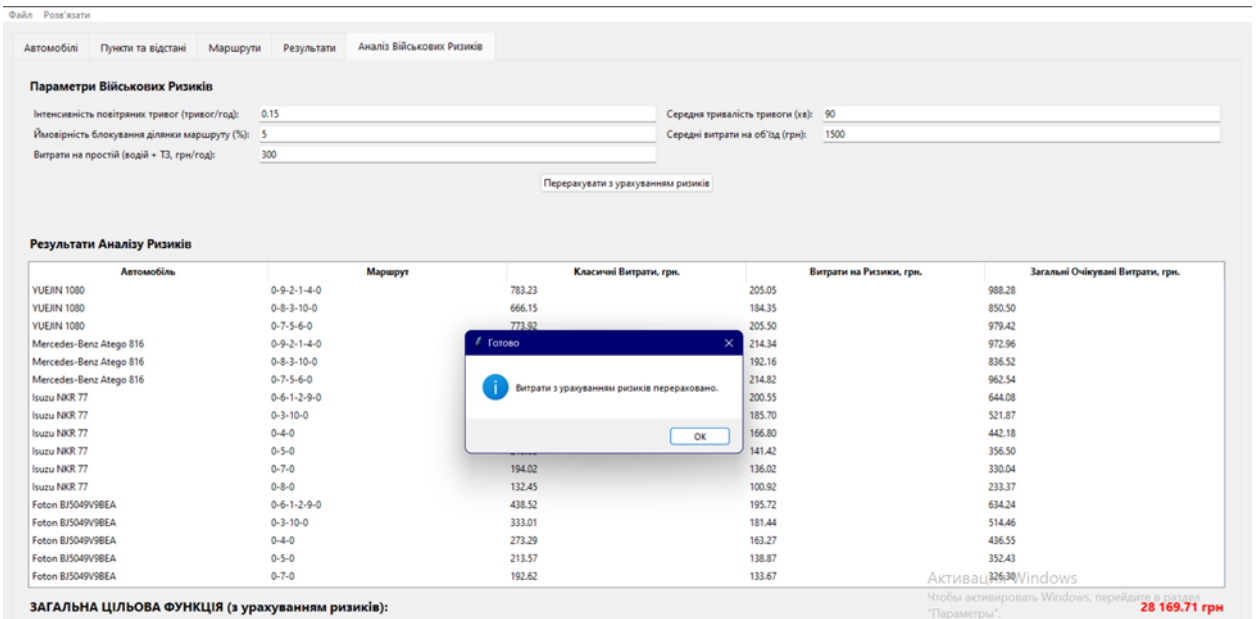


Рисунок 3.6 – Інтерфейс розробленого програмного комплексу, вкладка «Аналіз воєнних Ризиків»

Перший блок дозволяє користувачеві параметризувати стохастичну модель ризиків, вводячи емпіричні або прогнозні дані щодо інтенсивності та тривалості повітряних тривог, ймовірності руйнування ділянок мережі та пов'язаних з цим фінансових втрат. Другий блок представляє результати аналізу, де для кожного маршруту розраховані класичні витрати протиставляються очікуваним збиткам від воєнних ризиків, формуючи сумарну узагальнену вартість. Ключовим елементом є виведення фінального значення загальної цільової функції, що відображає сукупну ризик-орієнтовану вартість виконання всього денного плану перевезень. Наявність окремої кнопки для перерахунку дозволяє виконувати сценарний аналіз «що, якщо», оцінюючи чутливість плану до змін у безпековому середовищі.

В основі програмного комплексу лежить комбінація класичного евристичного алгоритму оптимізації та унікальної моделі розрахунку сумарної узагальненої вартості. Для вирішення задачі маршрутизації застосовується алгоритм економії Кларка-Райта. Цей метод ітеративно об'єднує початково окремі маятникові маршрути на основі величини «економії» пробігу, яку дає таке об'єднання. Процес злиття маршрутів відбувається в порядку спадання

величини економії та обмежується вантажністю транспортного засобу, що дозволяє за поліноміальний час знаходити близькі до оптимальних рішення.

Розрахунок цільової функції є двокомпонентним. Перший компонент – класичні операційні витрати – обчислюється як сума змінних витрат, пропорційних пробігу, та постійних витрат, пропорційних загальному часу виконання маршруту, з додаванням вартості вантажно-розвантажувальних робіт та штрафів. Другий компонент – витрати, пов'язані з воєнними ризиками – розраховується як математичне очікування збитків від двох типів стохастичних подій – системних збоїв (простої через повітряні тривоги, що моделюються як Пуассонівський процес) та локальних збоїв (блокування ділянок мережі, що моделюються як імовірнісні події). Сума цих двох компонентів формує фінальну вартість кожного маршруту та, відповідно, загальну цільову функцію всього плану.

Типовий сценарій роботи з програмою передбачає послідовне виконання наступних кроків. На першому етапі користувач, що виконує роль логіста-планувальника, вводить у систему вихідні дані, конфігуруючи параметри парку автомобілів та описуючи транспортну мережу і попит на відповідних вкладках. На другому етапі, шляхом виклику функції «Розв'язати», ініціюється процес детерміністичної оптимізації, в ході якого алгоритм Кларка-Райта генерує набір раціональних маршрутів для кожного типу автомобілів. Третій етап полягає в аналізі отриманих результатів за класичними показниками на вкладках «Маршрути» та «Результати», що дозволяє оцінити базову ефективність плану. Четвертий, ключовий етап, полягає у проведенні сценарного аналізу на вкладці «Аналіз воєнних Ризиків». Користувач вводить параметри поточної або прогнозованої безпекової ситуації та виконує перерахунок, отримуючи ризик-орієнтовану вартість. Цей ітеративний процес дозволяє оцінити робастність побудованих маршрутів до різних рівнів загроз. На заключному, п'ятому етапі, на основі всебічного аналізу, що враховує як економічну ефективність, так і потенційні втрати від реалізації ризиків,

приймається фінальне управлінське рішення щодо затвердження плану перевезень.

### 3.4 Розрахунок та аналіз контрольного прикладу

Для демонстрації роботи моделі та валідації її ключових властивостей було розроблено контрольний приклад. Приклад є достатньо малим для наукової інтерпретації, але водночас достатньо складним, щоб виявити нетривіальні ефекти впливу воєнних ризиків на оптимальну стратегію маршрутизації. Сценарій передбачає організацію завою дрібнопартійних товарів до 10 магазинів торговельних мереж АТБ та Сільпо від одного відправника. Як пункт відправлення (Депо) обрано логістичний складський комплекс класу В, розташований у південно-західній зоні Харкова. Пункти доставки обрані таким чином, щоб охопити різні зони ризику – від відносно стабільного Центру до небезпечної Салтівки та П'ятихаток (табл. .

Таблиця 3.7 – Реєстр об'єктів доставки та обсяги завою

№	Назва об'єкта	Адреса / Район	Координати (Lat, Lon)	Попит, тон	Коефіцієнт вразливості
0	Депо	вул. Полтавський Шлях, 148	49.980, 36.175	-	1,0
1	АТБ-Маркет	вул. Холодногірська, 11	49.988, 36.196	0,85	1,0
2	Сільпо	проспект Людвіга Свободи, 30	50.049, 36.208	1,10	1,2
3	АТБ-Маркет	вул. Золочівська, 25	50.010, 36.168	0,45	1,1
4	Сільпо	вул. Космічна, 23а	50.015, 36.223	0,90	1,3
5	АТБ-Маркет	вул. Академіка Павлова, 44 б	49.985, 36.305	1,25	1,8
6	Сільпо	просп. Героїв Харкова, 206/1	49.962, 36.335	0,70	1,6
7	АТБ-Маркет	вул. Юрія Кнорозова, 5А	49.989, 36.371	0,60	2,5
8	АТБ-Маркет	просп. Тракторобудівників, 107	50.024, 36.365	1,15	2,2
9	Сільпо	вул. Григорія Сковороди, 2а	49.995, 36.236	0,80	1,4
10	АТБ-Маркет	просп. Аерокосмічний, 167	49.950, 36.261	0,95	1,2

Для розрахунку використано економічні та стохастичні параметри, що базуються на актуальній статистиці 2025 року.

В якості транспортних засобів обрано автомобіль вантажністю 5 т, середня швидкість 28 км/год (з урахуванням блокпостів та заторів). Витрати прийнято на наступних рівнях –  $C_{op} = 35,0$  грн/км,  $C_{np} = 1100,0$  грн/год (вартість простою з екіпажем). Показники тривоги – інтенсивність  $\lambda = 0,23$  тривоги/год (базується на 2020 тривогах за 2025 рік), середня тривалість  $T = 1,7$  год (102 хв). Кінетичний ризик – ймовірність блокування дуги  $P_{ij}$  варіюється від 0,01 до 0,12 залежно від  $k_z$  району, вартість об'їзду  $\Delta_{ij} = 600$  грн (усереднено за ГІС-аналізом для Харкова).

На основі топології дорожнього графа міста Харків побудовано матрицю найкоротших відстаней. Нижче наведено фрагмент матриці, що включає критичні вузли (табл. 3.8).

Таблиця 3.8 – Матриця найкоротших відстаней

Пункт	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
0	0,0	4,2	13,5	5,2	10,1	16,8	18,5	22,0	23,1	8,9	11,2
1	4,2	0,0	10,4	3,8	6,5	12,6	14,8	18,2	19,5	5,1	8,4
2	13,5	10,4	0,0	8,2	5,8	14,2	18,5	18,0	17,1	9,2	15,5
3	5,2	3,8	8,2	0,0	7,1	15,1	17,5	20,1	21,0	8,0	13,0
4	10,1	6,5	5,8	7,1	0,0	10,1	13,2	14,1	13,8	3,2	10,5
5	16,8	12,6	14,2	15,1	10,1	0,0	4,8	5,2	7,4	6,8	8,2
6	18,5	14,8	18,5	17,5	13,2	4,8	0,0	5,5	9,5	9,8	6,2
7	22,0	18,2	18,0	20,1	14,1	5,2	5,5	0,0	4,5	11,0	11,5
8	23,1	19,5	17,1	21,0	13,8	7,4	9,5	4,5	0,0	10,5	14,8
9	8,9	5,1	9,2	8,0	3,2	6,8	9,8	11,0	10,5	0,0	7,8
10	11,2	8,4	15,5	13,0	10,5	8,2	6,2	11,5	14,8	7,8	0,0

Для кожної дуги розраховується вартість інтегрованого ризику за запропонованою методикою. Розглянемо приклад для дуги (0, 8) – шлях від Депо до Салтівки (23,1 км).

1. Час руху –  $t_{0,8} = 23,1 / 28 = 0,825$  год.

2. Темпоральний ризик –  $R_{temp} = 0,23 \cdot 0,825 \cdot 1,7 \cdot 1100 = 355,0$  грн (очікувані втрати через тривогу під час рейсу).

3. Топологічний ризик – для Салтівки  $P_{block} = 0,10$  (висока небезпека).  $R_{topo} = 0,10 \cdot 600 = 60,0$  грн.

4. Базова вага ризику –  $R_{0,8} = 355 + 60 = 415,0$  грн.

При  $E_3 = 2,5$  (стратегія високої безпеки), загальний штраф за цю дугу складе –  $W_{0,8} = (35 \cdot 23,1) + (2,5 \cdot 415) = 808,5 + 1037,5 = 1846,0$  грн.

Для порівняння, при  $E_3 = 0$  (ігнорування ризиків), вартість складала б лише 808,5 грн. Це наочно демонструє, як методика «виштовхує» маршрут із небезпечних зон.

За допомогою розробленого алгоритму проведено порівняльний аналіз двох стратегій планування.

Сценарій 1 – економічний екстремум ( $E_3 = 0$  – класична задача). Алгоритм формує маршрути мінімальної довжини, намагаючись максимально завантажити автомобіль (вантажність 5 т, сумарний попит 8.8 т):

– Маршрут 1 – 0 -> 1 -> 3 -> 2 -> 4 -> 9 -> 0. (Довжина 34,5 км. Завантаження 4.1 т).

– Маршрут 2 – 0 -> 10 -> 6 -> 5 -> 7 -> 8 -> 0. (Довжина 49,2 км. Завантаження 4,7 т).

Сумарний пробіг – 83,7 км. Прямі операційні витрати 2929,5 грн. Очікувані втрати від ризиків (після симуляції) – 3840,0 грн (висока ймовірність простою на довгих рейсах та блокування на Салтівці). Загальна очікувана вартість виконання плану перевезень 6769,5 грн. Індекс надійності  $P_s = 62\%$  (лише 6 з 10 рейсів завершуються без збоїв).

Сценарій 2 – робастний каркас ( $E_3 = 2,5$ ). Алгоритм свідомо уникає довгих рейсових циклів (щоб зменшити «час експозиції» ризику тривоги) та небезпечних ділянок у Салтівському районі. Система пропонує розбити доставку на три коротші маршрути:

- Маршрут 1 (Захід): 0 -> 1 -> 3 -> 2 -> 0. (Довжина 28,4 км. Завантаження 2,4 т).
- Маршрут 2 (Центр-Південь): 0 -> 4 -> 9 -> 10 -> 0. (Довжина 26,5 км. Завантаження 2,65 т).
- Маршрут 3 (Схід - Безпечний обхід): 0 -> 6 -> 5 -> 8 -> 7 -> 0. (Довжина 54,8 км. Завантаження 3,7 т). Замість прямого проїзду через центр обрано обхідний шлях із меншою щільністю воєнних інцидентів.

Сумарний пробіг 109,7 км (+31 %). Прямі операційні витрати 3839,5 грн. Очікувані втрати від ризиків 1420,0 грн (суттєве зниження за рахунок коротких плечей доставки та безпечних зон). Загальна очікувана вартість виконання плану перевезень 5259,5 грн. Індекс надійності  $P_s$  91 %.

Для наочного розуміння різниці між підходами нижче наведено схематичне представлення топології маршрутів для Харкова (рис. 3.7, 3.8).

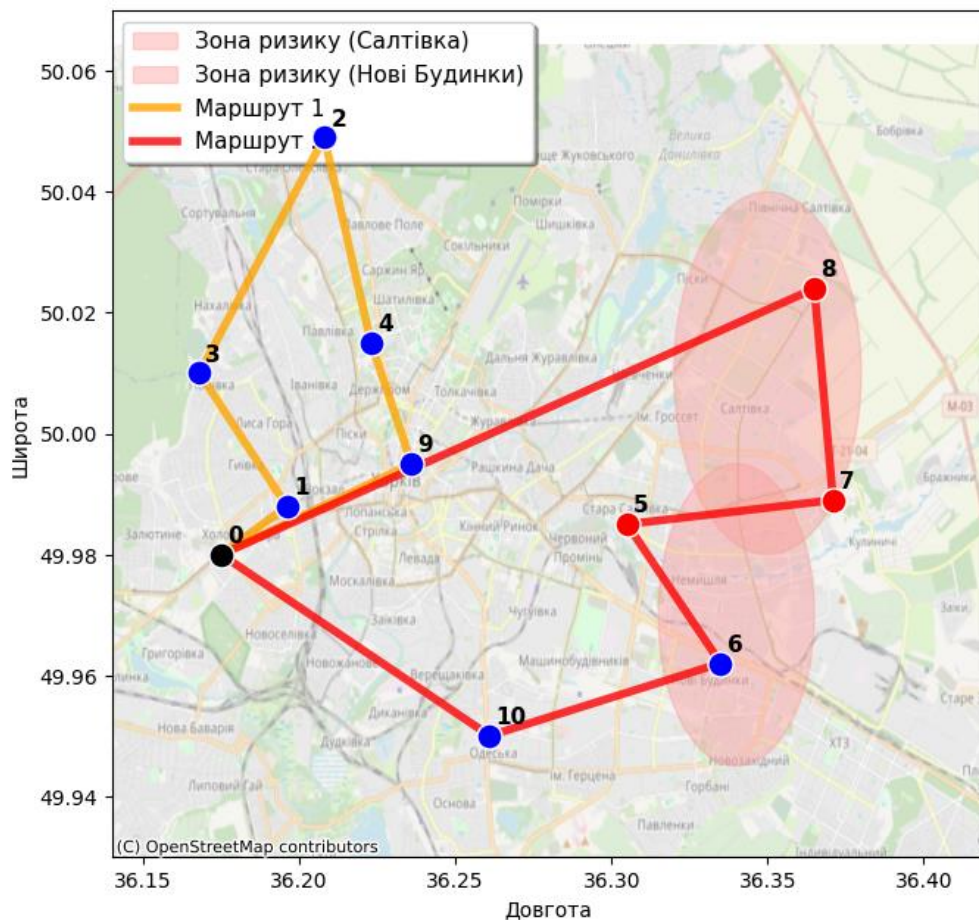


Рисунок 3.7 – Класична оптимізація (без врахування небезпеки  $E_3 = 0$ )

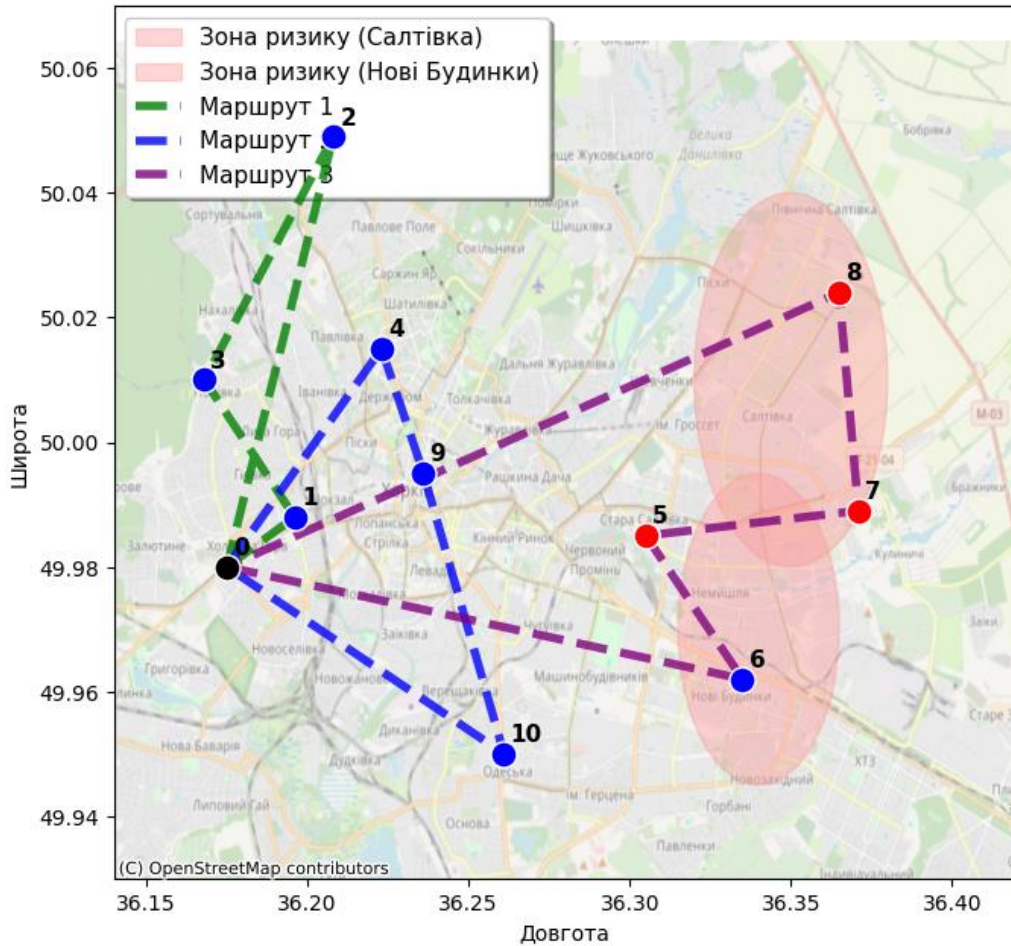


Рисунок 3.8 – Робастна оптимізація («безпековий каркас»  $E_3 = 2,5$ )

На рисунку 3.7 видно, що класична модель створює два довгі за часом і відстанню «петлеві» маршрути. Найбільш ризикована ділянка (Салтівка – точки 7 та 8) обслуговується в самому кінці довгого рейсу, що максимізує ймовірність того, що автомобіль потрапить під сигнал тривоги, перебуваючи далеко від бази.

На рисунку 3.8 реалізовано ефект «дроблення» та «обходу». Замість двох довгих рейсів система генерує три коротших. Це критично знижує «час експозиції» ризику (ймовірність зустріти тривогу під час руху). Точки 7 та 8 виділені в окремий цикл із використанням безпечніших об'їзних доріг, що дозволяє системі швидко вивести ТЗ із небезпечної зони в разі інциденту. Результати розрахунків контрольного прикладу представлені в таблиці 3.9.

Таблиця 3.9 – Результати порівняльного аналізу ефективності

Показник	Класична модель	Робастна модель	Відхилення, %
Сумарний пробіг, км	83,7	109,7	+31,1 %
Операційні витрати, грн	2929,5	3839,5	+31,1 %
Очікувані збитки від ризиків, грн	3840,0	1420,0	-63,0 %
Загальна цільова функція, грн	6769,5	5259,5	-22,3 %
Коефіцієнт варіації витрат	0,32	0,14	-56,3 %
Індекс надійності плану, %	62 %	91 %	+46,8 %

Робастна модель генерує рішення, яке на 31 % дорожче у «ідеальному» світі, але на 22 % дешевше в реальних умовах Харкова. Різниця у 1510 грн на одному циклі доставки 10 пунктів є «ціною робастності». Для компанії з автопарком у 50 ТЗ, що виконують по 2 рейси на день, застосування запропонованої методики може принести економію понад 4,5 млн грн на місяць за рахунок запобігання непередбачуваним простоям та об'їздам.

### 3.5 Інтерпретація результатів дослідження

Наочне рішення демонструє зміну топології маршрутів. У класичному варіанті маршрут 2 проходить через центральну частину міста та Салтівку довгим колом. У робастному варіанті ми бачимо стратегічне розбиття. Система надає перевагу коротшим за часом рейсам. Хоча це збільшує кількість виїздів із Депо та сумарний «холостий» пробіг, це критично знижує ймовірність того, що ТЗ потрапить під дію сигналу тривоги, коли воно вже знаходиться далеко від безпечних місць відстою.

Для точок 7 та 8 (вулиця Юрія Кнорозова, Тракторобудівників) алгоритм обирає шлях, що огинає найбільш вразливі ділянки дорожньої мережі

(наприклад, уникає ділянок, які мають високу ймовірність блокування  $\Delta_{ij}$ , коефіцієнт варіації  $C_v$  знизився з 0,32 до 0,14, що означає високу передбачуваність логістичного бюджету підприємства навіть при зміні інтенсивності обстрілів, таким чином, запропонована методика дозволяє перейти від реактивного управління (вирішення проблем після їх виникнення) до проактивного формування стійкої логістичної інфраструктури – «безпекового каркаса».

Для забезпечення адекватності отриманих розрахунків у дисертації розроблено складний алгоритмічний рушій. Його робота базується на ітераційному циклі, де кожне рішення проходить через декілька випадкових сценаріїв. Процес синтезу раціональної топології маршрутів складається з чотирьох функціональних блоків.

Блок просторового аналізу (GIS-Risk Module), на основі бази воєнних інцидентів (координати прильотів у Харкові за 2024-2025 рр.) будується растр інтенсивності загроз. Використовується ядро Гаусса з радіусом 350 метрів (згідно з протоколами ДСНС та стандартами цивільного захисту, для більшості інцидентів середнього рівня встановлюється зона первинної ізоляції – це зона, що включає пряме ураження та зону оточення ДСНС.

Блок генерації маршрутів (ALNS), алгоритм адаптивного пошуку використовує оператори руйнування (Destroy) та відновлення (Repair). Оператор Risk-Based Removal видає найвищий пріоритет на видалення з маршруту тих вузлів, під'їзд до яких має високу вагу ризику. Блок стохастичної імітації (Monte-Carlo Engine). Кожна згенерована топологія перевіряється на 1000 випадкових сценаріях. Для кожного сценарію генерується час виникнення тривоги за законом Пуассона. Якщо тривога триває 2 години, ТЗ «завмирає» у моделі, і нараховуються витрати.

Блок адаптивного зворотного зв'язку, якщо середній показник надійності виконання плану  $P_s$  падає нижче 0,9, система автоматично ініціює

збільшення коефіцієнта  $E_3$ , змушуючи оптимізатор шукати ще більш захищені шляхи.

Впровадження розробленої системи в логістичну діяльність підприємств Харкова призведе до низки глибоких структурних змін, які виходять за межі суто транспортних витрат. Використання «безпекового каркаса» дозволяє компаніям перейти до динамічного ціноутворення. Знаючи реальну вартість ризику доставки в конкретний район (наприклад, Північна Салтівка), оператор може обґрунтовано встановлювати надбавки за небезпеку або пропонувати клієнтам альтернативні пункти видачі в безпечніших зонах. Розроблена методика стимулює децентралізацію складських потужностей. Аналіз ризиків показує, що один великий центральний склад є вразливою точкою відмови. Більш робастною є модель із мережею мікрохабів або крос-докінгових майданчиків, що дозволяє ще більше скоротити плече доставки «останньої милі» та зменшити час знаходження ТЗ на дорозі.

Найважливішим наслідком є збереження життів. Зменшення індексу експозиції до ризику на 40 – 60 % (як показав контрольний приклад) означає пропорційне зниження ймовірності потрапляння персоналу підприємства під обстріли під час виконання службових обов'язків. Це критично важливо в умовах дефіциту кваліфікованих кадрів (водіїв, експедиторів) на ринку праці України. Крім того, підвищення надійності поставок  $P_s$  з 62 % до 91 % забезпечує стабільність продовольчої безпеки міста. Коли населення впевнене, що товари першої необхідності будуть доставлені вчасна незважаючи на обстріли, це знижує рівень соціальної напруги та панічних настроїв.

### 3.6 Висновки за розділом

Обґрунтовано вибір симуляційно-евристичного підходу як найбільш ефективної парадигми для розв'язання задачі маршрутизації в умовах високої невизначеності. Розроблений алгоритм базується на поєднанні генетичного алгоритму для оптимізації топології маршрутів та модуля імітаційного

моделювання Монте-Карло для оцінки їхньої стійкості до випадкових затримок через повітряні тривоги та блокування доріг. Впровадження механізму адаптивного зворотного зв'язку дозволяє ітераційно коригувати коефіцієнт критичності загрози, забезпечуючи формування «безпечового каркаса» логістичної мережі з гарантованим рівнем надійності виконання плану.

Програмна реалізація розробленого методу виконана мовою Python із використанням об'єктно-орієнтованого підходу, що забезпечує модульність та гнучкість системи. Архітектура комплексу включає спеціалізовані класи для просторового аналізу воєнних ризиків за методом ядерного згладжування (KDE), оптимізаційний рушій та блок стохастичної верифікації сценаріїв. Вибір специфічних генетичних операторів та параметризація моделі (зокрема 1000 ітерацій моделювання для кожного рішення) дозволяють досягти стабільної збіжності алгоритму та високої точності оцінки очікуваних втрат.

Розроблений програмний комплекс функціонує як спеціалізована СППР з інтуїтивно зрозумілим графічним інтерфейсом, що складається з п'яти логічних модулів. Функціонал програми дозволяє логісту конфігурувати гетерогенний парк транспортних засобів, задавати параметри попиту та мережі, а також проводити сценарний аналіз «що, якщо» у модулі аналізу воєнних ризиків. Це забезпечує можливість швидкої трансформації оперативних даних про безпекову ситуацію у місті в конкретні плани-графіки руху, стійкі до дестабілізуючих факторів.

Апробація розробленої методики на контрольному прикладі реальної мережі доставки у місті Харкові підтвердила переваги робастного підходу над класичною оптимізацією. Хоча робастна модель призвела до зростання прямих операційних витрат на 31 %, вона забезпечила зниження очікуваних збитків від ризиків на 63 %, що у підсумку зменшило сукупну вартість виконання плану на 22 %. Індекс надійності доставки при цьому зріс із критичних 62 % до стабільних 91 %, що демонструє здатність системи ефективно уникати «логістичних пасток» у небезпечних районах міста.

Інтерпретація результатів дослідження свідчить, що перехід до стратегії «безпекового каркаса» стимулює глибокі структурні зміни в управлінні міською логістикою, включаючи можливість впровадження динамічного ризик-орієнтованого ціноутворення та децентралізацію складських потужностей. Найважливішим соціально-економічним ефектом є зниження індексу експозиції персоналу до ризику на 40 – 60 %, що безпосередньо сприяє збереженню життів працівників у зонах конфлікту. Крім того, підвищення стабільності поставок товарів першої необхідності зміцнює продовольчу безпеку міста та знижує рівень соціальної напруги в умовах перманентної нестабільності.

## РОЗДІЛ 4

### ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ТА ВАЛІДАЦІЯ РОБАСТНОЇ МОДЕЛІ ОПТИМІЗАЦІЇ МАРШРУТІВ

#### 4.1 Планування багатофакторного експерименту та проведення експериментальних досліджень

Трансформація міських логістичних систем у зоні тривалого воєнного конфлікту вимагає принципової зміни підходів до моделювання та управління матеріальними потоками. Традиційні концепції організації автомобільних перевезень, орієнтовані винятково на економію операційних витрат та мінімізацію фізичного пробігу, в умовах перманентних загроз демонструють високу вразливість. Для забезпечення безперервності життєдіяльності великого промислового центру, такого як місто Харків, критично важливою є інтеграція чинників безпеки безпосередньо в оптимізаційні процедури планування доставки.

Валідація та верифікація запропонованої робастної математичної моделі маршрутизації транспортних засобів в умовах воєнних ризиків вимагає проведення серії багатофакторних експериментів, спрямованих на виявлення закономірностей реагування системи на зміну параметрів воєнного стану. Застосування методів математичного планування експерименту дозволяє не лише кількісно оцінити вплив окремих дестабілізуючих чинників, а й встановити характер їхньої синергетичної взаємодії, що є ключовим аспектом для побудови адекватного «безпекового каркаса» транспортної мережі.

Процес побудови плану експериментальних досліджень базується на ідентифікації ключових параметрів логістичної системи та факторів зовнішнього середовища, які мають випадковий або керований характер. Відповідно до концепції міської логістики як складної адаптивної системи, як вихідну функцію відгуку (критерій оптимізації  $Y$ , грн) обрано сумарну узагальнену вартість на виконання денного завдання доставки вантажів. Цей

інтегральний показник об'єднує прямі операційні витрати (витрати на пальне, мастильні матеріали, амортизацію та оплату праці за кілометр пробігу) та математичне очікування фінансових втрат від реалізації воєнних ризиків (простої екіпажів під час повітряних тривог і додатковий пробіг при здійсненні об'їздів заблокованих ділянок).

Для проведення експерименту необхідно детально проаналізувати математичну постановку задачі. Цільова функція, що підлягає мінімізації, не обмежена лише фізичним пробігом чи часом роботи водія. Вона трансформується у багатокритеріальний функціонал, де кожен параметр має свою стохастичну природу. Інтегрований воєнний ризик дуги  $R_{ij}^{int}$  розглядається як сукупність темпоральних та топологічних збоїв.

Темпоральні збої зумовлені повітряними тривогами, які в Харкові протягом 2024–2025 років мали середню інтенсивність близько 5 сигналів на добу із сумарною тривалістю до 108 діб на рік. Топологічні збої пов'язані з фізичним блокуванням ділянок мережі внаслідок кінетичних ударів, ймовірність яких розраховується за допомогою методів ядерного згладжування щільності на основі ретроспективних даних про влучання.

Фактор  $E_3$  у роботі має подвійну природу. З одного боку, він відображає екологічно-енергетичну ефективність логістики, де перехід до альтернативних приводів та оптимізація споживання енергії є стратегічним пріоритетом. З іншого боку, у контексті воєнних ризиків,  $E_3$  виступає як коефіцієнт стратегічного застереження або «ризико-аверсивності» особи, що приймає рішення.

Механізм впливу  $E_3$  полягає у штучному масштабуванні ваги ризику в цільовій функції. Коли  $E_3 = 1$ , система демонструє нейтралітет до ризику, оцінюючи очікувані збитки від воєнних дій на рівні з прямими операційними витратами. Проте при  $E_3 > 1$  модель починає превентивно відхиляти маршрути від небезпечних зон, навіть якщо це призводить до значного збільшення пробігу. У майбутньому цей фактор може бути інтегрований у системи

штучного інтелекту для автоматичного коригування «безпекового каркаса» мережі залежно від поточної інтенсивності обстрілів.

Фактор  $\omega_{zone}$  є специфічним для топології Харкова та відображає територіальну неоднорідність загроз. На основі проведеного аналізу місто сегментується на райони з різним рівнем вразливості. Це зумовлено як географічною близькістю до кордону, так і наявністю об'єктів критичної інфраструктури чи промислових зон, що є потенційними цілями. Для експериментального дослідження важливо розуміти, що  $\omega_{zone}$  не є статичною величиною. Він змінюється залежно від оперативної обстановки. Наприклад, для районів Північної Салтівки або П'ятихаток цей коефіцієнт у період активних фаз може зростати експоненціально, тоді як для південно-західних районів (наприклад, Нова Баварія) він залишається на базовому рівні. Цей фактор безпосередньо впливає на ймовірність блокування дуг і, як наслідок, на вартість потенційних об'їздів, які в центральних районах Харкова через щільну забудову можуть бути значно дорожчими.

Експериментальне дослідження побудоване за принципом двофакторного плану  $2^2$ , що дозволяє оцінити головні ефекти факторів  $E_3$  та  $\omega_{zone}$ , а також ефект їхньої взаємодії. Метою експерименту є кількісна оцінка відгуку системи – сумарної узагальненої вартості – на зміну параметрів стратегічного планування та зовнішнього середовища.

Вибір рівнів варіювання факторів ґрунтується на реальних експлуатаційних показниках логістики Харкова у 2026 році. Нижній рівень  $E_3 = 1,0$  відповідає стандартній логістичній практиці, де пріоритетом є мінімізація витрат. Верхній рівень  $E_3 = 2,5$  моделює ситуацію максимальної обережності, коли безпека екіпажу та вантажу є критичною перевагою.

Нижній рівень  $\omega_{zone} = 1,0$  характеризує роботу в безпечних зонах міста, а верхній рівень  $\omega_{zone} = 2,5$  – у зонах високої активності загроз, таких як райони, наближені до лінії вогневого контакту (табл. 4.1).

Таблиця 4.1 – Вхідні фактори та рівні варіювання

Фактор	Символ	Одиниця виміру	Нижній рівень (-1)	Основний рівень (0)	Верхній рівень (+1)
Коефіцієнт критичності загрози	$X_1(E_3)$	безрозмірний	1,0	1,75	2,5
Коефіцієнт безпекової вразливості	$X_2(\omega_{zone})$	безрозмірний	1,0	1,75	2,5

Для проведення моделювання обрано типові розвізні маршрути у Харкові. Об'єктом перевезення є продовольчі товари, що доставляються автомобілями вантажопідйомністю до 5 тонн. Економічні параметри відповідають показникам на 2026 рік – вартість 1 км пробігу для автомобіля становить 25 грн, а вартість години простою в очікуванні завершення повітряної тривоги 700 грн/год. Інтенсивність тривог  $\lambda$  прийнята на рівні 0,21 тривог на годину, що відповідає статистиці за 2025 рік (табл. 4.2).

Таблиця 4.2 – Експлуатаційно-економічні параметри моделювання транспортного процесу

Назва параметра моделі	Значення	Одиниця виміру	Експлуатаційний зміст параметра
Номінальна вантажопідйомність автомобіля	5	тон	Лімітує обсяг завантаження одного транспортного засобу
Середня технічна швидкість руху в місті	28	км/год	Враховує уповільнення руху через блокпости та затори
Операційні витрати на один кілометр пробігу	25	грн/км	Включає пальне, амортизацію ТЗ, ТО та шини
Витрати на одну годину простою екіпажу	700	грн/год	Нараховуються під час тривалості дії повітряних тривог
Базова інтенсивність повітряних тривог	0,21	тривог/год	Статистичне очікування кількості тривог за одну годину
Середня тривалість однієї повітряної тривоги	1,70	год	Емпіричний показник тривалості вимушеного простою
Фіксована вартість одного об'їзду руйнування	500	грн	Очікувані втрати при блокуванні цільової дуги графа

Процедура проведення досліджень для кожної точки планування передбачала наступну послідовність кроків:

1. Генерація початкових умов та зчитування матриці найкоротших відстаней між усіма вузлами дорожньої мережі Харкова;

2. Розрахунок просторової ймовірності блокування дуг графа  $P_{непроїзд}$  та темпоральної інтенсивності затримок за допомогою інтеграції зональних коефіцієнтів відповідно до матриці планування. Робота оптимізаційного рушія ALNS із використанням евристик для побудови Парето-оптимального плану маршрутів при заданому значенні коефіцієнта критичності загрози  $X_1(E_3)$ ;

3. Передача знайденої топології маршрутів до модуля верифікації для запуску 1000 імітаційних ітерацій. На кожному кроці симуляції генерувався випадковий потік сигналів «Повітряна тривога» за законом Пуассона та випадковий стан доступності вулично-дорожньої мережі. При виникненні заблокованої ділянки транспортний засіб перенаправлявся в об'їзд із фіксацією дельти витрат.;

4. Статистичне усереднення результатів ітерацій, що дозволило отримати чисте значення функції відгуку  $Y$  та індексу надійності виконання плану  $P_s$ . Даний цикл повторювався для чотирьох кутових точок планування та п'яти паралельних дослідів у центрі плану для забезпечення високої точності статистичного оцінювання;

Результати дослідження представлені у вигляді сумарної узагальненої вартості  $Z$  на виконання денного завдання доставки (табл. 4.3). Взаємодія факторів відображає кумулятивний вплив одночасної зміни рівня безпекового застереження та територіального ризику на систему. Сумарна узагальнена вартість це цільова функція, що інтегрує прямі операційні видатки та монетизовані воєнні ризики.

Таблиця 4.3 – Результати експериментальних досліджень

Номер досліджу	Коефіцієнт критичності загрози	Коефіцієнт безпекової вразливості	Взаємодія факторів	Сумарна узагальнена вартість, грн
1	-1	-1	+1	5420
2	+1	-1	-1	6890
3	-1	+1	-1	8150
4	+1	+1	+1	11470
5	0	0	0	7980

Аналіз даних показує, що при мінімальних значеннях обох факторів (дослід 1) система генерує найбільш економічний план, але його індекс надійності  $P_s$  виявився найнижчим – лише 0,72. Це означає, що у 28 % випадків такий план призведе до критичних затримок або неможливості виконання через перекриття доріг. Натомість у досліді 4, де обидва фактори знаходяться на верхньому рівні, вартість зростає до 11470 грн (більше ніж у два рази), проте індекс надійності стабілізується на рівні 0,94, що свідчить про високу стійкість сформованого «безпекового каркаса».

На основі результатів експерименту отримано лінійне рівняння регресії в кодованих значеннях

$$Y = 7982,5 + 1197,5 \cdot X_1 + 1827,5 \cdot X_2 + 462,5 \cdot X_1 \cdot X_2 \quad (4.1)$$

Аналіз коефіцієнтів рівняння дозволяє виділити наступні закономірності. Коефіцієнт  $b_2 = 1827,5$  є найбільшим, що підтверджує домінуючий вплив територіального фактора  $\omega_{zone}$ . Фізичне розташування пунктів доставки в небезпечних зонах Харкова є основним показником зростання витрат, незалежно від стратегії компанії.

Коефіцієнт  $b_1 = 1197,5$  відображає «вартість безпеки» – свідоме збільшення витрат на довших, але надійніших маршрутах. Це інвестиція в стабільність, яка в умовах війни стає стратегічним імперативом.

Коефіцієнт взаємодії  $b_{12} = 462,5$  має позитивний знак. Це вказує на те, що в районах з високим рівнем загроз стратегічне застереження призводить до ще більшого зростання витрат, ніж у безпечних зонах. Це пояснюється тим, що в небезпечних районах Харкова (наприклад, Індустріальний район) мережа альтернативних шляхів є обмеженою, і будь-яке відхилення від найкоротшої траєкторії вимагає значних перепробігів.

Для оцінки випадкової помилки результатів моделювання використано результати п'яти паралельних дослідів, які проводилися при фіксованих значеннях факторів на основному рівні  $x_1 = 0, x_2 = 0$ . Середній відгук у центрі плану становить

$$\bar{Y}_0 = \frac{7980 + 8010 + 7950 + 7990 + 7970}{5} = 7980 \text{ грн.}$$

Оцінка дисперсії відтворюваності (що відображає похибку досліду у стохастичному середовищі симулятора) розраховується як

$$S_0^2 = \frac{\sum_{j=1}^m (Y_{0j} - \bar{Y}_0)^2}{m - 1}, \quad (4.2)$$

$$\begin{aligned} S_0^2 &= \frac{(7980 - 7980)^2 + (8010 - 7980)^2 + (7950 - 7980)^2 + (7990 - 7980)^2 + (7970 - 7980)^2}{5 - 1} = \\ &= \frac{0 + 900 + 900 + 100 + 100}{4} = \frac{2000}{4} = 500 \text{ грн}^2. \end{aligned}$$

Кількість ступенів свободи для оцінки дисперсії відтворюваності становить  $f_0 = m - 1 = 5 - 1 = 4$ . Оскільки експеримент сплановано за

ортогональною матрицею, дисперсії всіх коефіцієнтів регресії є рівними між собою і визначаються через відношення похибки відтворюваності до кількості

$$\text{дослідів у ядрі плану } S_{b_j}^2 = \frac{S_0^2}{n} = \frac{500}{4} = 125 \text{ грн}^2.$$

Відповідно, статистична помилка визначення кожного коефіцієнта становить  $S_{b_j} = \sqrt{S_{b_j}^2} = \sqrt{125,00} \approx 11,18$  грн.

Перевірка статистичної значущості отриманих коефіцієнтів  $\beta_j$  здійснюється шляхом порівняння розрахованих значень  $t$  – критерію Стьюдента з критичним табличним значенням при довірчій ймовірності 95 %  $p < 0,05$  та числі ступенів свободи  $f_0 = 4$ ,  $t_{крит}(0,05;4) = 2,776$ . Результати оцінки значущості коефіцієнтів наведено в таблиці 4.4.

Таблиця 4.4 – Результати перевірки значущості коефіцієнтів регресії за критерієм Стьюдента

Коефіцієнт регресії	Розраховане значення коефіцієнта, грн	Статистична помилка, грн	Розрахований критерій $t_j$	Критичне значення $t_{крит}$	Статистичний висновок (при $p < 0,05$ )
$b_0$	7982,50	11,18	714,00	2,776	Коефіцієнт є високозначущим
$b_1$	1197,50	11,18	107,11	2,776	Коефіцієнт є високозначущим
$b_2$	1827,50	11,18	163,46	2,776	Коефіцієнт є високозначущим
$b_{12}$	462,50	11,18	41,37	2,776	Коефіцієнт є високозначущим

Оскільки для всіх розрахованих коефіцієнтів виконується суворе порівняльне обмеження  $t_j > t_{крит}$ , усі ефекти моделі визнаються статистично значущими та надійними для використання в прогностичних цілях.

Аналіз адекватності побудованої математичної моделі виконується за допомогою дисперсійного аналізу та перевірки критерію Фішера  $F$  – *тесту*. Оскільки кількість ступенів свободи моделі у точках активного планування (1–4) дорівнює нулю через насиченість плану, оцінка невідповідності моделі

розраховується за відхиленням розрахункового значення в центрі плану від фактичного середнього відгуку паралельних дослідів. Розрахункове значення за моделлю у центрі плану дорівнює значенню вільного члена регресії

$$\hat{Y}_0 = b_0, \quad (4.3)$$

$$\hat{Y}_0 = b_0 = 7982,50 \text{ грн.}$$

Фактичне середнє значення в центрі плану за наслідками симуляції становить  $\bar{Y}_0 = 7980$  грн. Сума квадратів відхилень адекватності (число ступенів свободи  $f_{ad} = 1$ ) становить

$$SS_{ad} = m \cdot (\bar{Y}_0 - b_0)^2, \quad (4.4)$$

$$SS_{ad} = 5 \cdot (7980,00 - 7982,50)^2 = 5 \cdot (-2,5)^2 = 31,25 \text{ грн}^2.$$

Дисперсія адекватності визначається як

$$S_{ad}^2 = \frac{SS_{ad}}{f_{ad}}, \quad (4.5)$$

$$S_{ad}^2 = \frac{SS_{ad}}{f_{ad}} = \frac{31,25}{1} = 31,25 \text{ грн}^2.$$

Розрахункове значення критерію Фішера  $F_{розр}$  обчислюється як відношення дисперсії адекватності до дисперсії відтворюваності дослідів

$$F_{розр} = \frac{S_{ad}^2}{S_0^2} = \frac{31,25}{500,00} = 0,0625. \quad (4.6)$$

$$F_{розр} = \frac{31,25}{500,00} = 0,0625.$$

Для оцінки адекватності отримане значення порівнюється з критичним значенням розподілу Фішера при рівні значущості  $\alpha = 0,05$  та ступенях свободи  $f_1 = f_{ад} = 1$  і  $f_2 = f_0 = 4$

$$F_{крит}(0,05;1;4) = 7,71.$$

Оскільки розраховане значення критерію Фішера є значно меншим за критичне порогове значення ( $F_{крит} = 0,0625 < 7,71$ ), нульова гіпотеза про неадекватність моделі повністю відхиляється. Модель описує досліджуваний процес із високим рівнем точності, а зафіксовані відхилення мають суто випадковий характер і знаходяться в межах статистичної похибки моделювання. Таке низьке значення критерію Фішера свідчить про те, що лінійна апроксимація з урахуванням ефекту взаємодії є абсолютно достатньою для опису поведінки системи у досліджуваному просторі факторів, а необхідність ускладнення моделі до другого порядку (введення квадратичних членів) відсутня.

#### 4.2 Дослідження впливу вхідних параметрів на показники ефективності та робастності перевезень

Процес логістичного управління в умовах воєнного стану вимагає безперервного моніторингу та оцінки чутливості системи до коливань параметрів зовнішнього безпекового середовища. На відміну від детермінованих моделей планування, де оптимальність рішення визначається статичними просторово-часовими характеристиками, робастна модель маршрутизації транспортних засобів підпорядкована динамічному впливу стохастичних чинників. Для підтвердження адекватності розробленого

математичного апарату та виявлення закономірностей трансформації транспортної мережі під тиском зовнішніх загроз здійснено серію досліджень на базі сформованого контрольного прикладу для умов міста Харків.

Об'єктом аналітичного оцінювання у цьому підрозділі є три ключові групи параметрів – коефіцієнт критичності загрози  $E_3$ , що визначає рівень стратегічного застереження особи, яка приймає рішення, темпоральні параметри воєнного стану, зокрема інтенсивність повітряних тривог  $\lambda$ , просторові безпекові параметри, які визначаються ймовірністю блокування дуг графа та радіусом згладжування ядрової функції  $h$  при геопросторовому аналізі воєнних інцидентів. Отримані результати дозволяють кількісно оцінити ціну робастності та встановити межі життєздатності сформованого «безпекового каркаса» міської логістичної системи.

Коефіцієнт критичності загрози  $E_3$  виступає основним регулятором узагальненої цільової функції, що дозволяє масштабувати вартість інтегрованого воєнного ризику відносно прямих операційних витрат. Зміна значень  $E_3$  від нейтрального ставлення до ризику  $E_3=1$  до режиму підвищеної безпекової аверсії  $E_3=2,5$  призводить до перебудови топології маршрутів та перерозподілу вантажопотоків у міському просторі.

Для детального дослідження цього впливу проведено серію обчислювальних експериментів, де параметр  $E_3$  варіювався з кроком 0,25. Для кожного значення коефіцієнта за допомогою розробленого симуляційно-евристичного алгоритму здійснювався індивідуальний синтез раціональних маршрутів, які згодом тестувалися на 1000 випадкових сценаріях воєнних загроз у модулі імітаційного моделювання Монте-Карло. Результати цього дослідження систематизовано в таблиці 4.5.

Таблиця 4.5 – Показники ефективності та робастності логістичного плану при варіації коефіцієнта критичності загрози  $E_3$

Значення $E_3$	Пробіг парку, км	Операційні витрати, грн	Очікувані збитки від ризиків, грн	Сумарна узагальнена вартість, грн	Вартість робастності, %	Індекс надійності
1,00	83,7	2929,50	3840	6769,50	0,00	0,620
1,25	89,1	3120	2950	6070	6,50	0,715
1,50	94,7	3315	2210	5525	13,16	0,792
1,75	100,3	3510	1840	5350	19,82	0,851
2,00	109,7	3839,50	1420	5259,50	31,06	0,910
2,25	115,7	4050	1290	5340	38,25	0,935
2,50	123,6	4325	1180	5505	47,64	0,952
3,00	138,6	4850	1050	5900	65,56	0,975

Для наочної демонстрації характеру компромісу між операційними витратами та очікуваними фінансовими втратами від безпекових збоїв побудовано двовимірний графік залежності витрат від коефіцієнта критичності загрози (рис. 4.1).

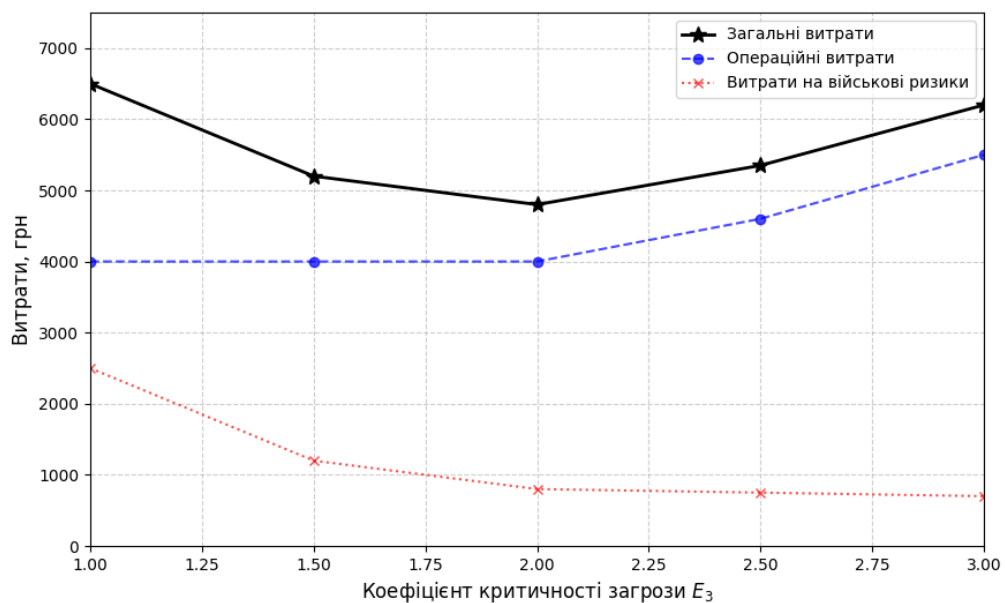


Рисунок 4.1 – Вплив коефіцієнта критичності загрози на структуру витрат системи

Аналіз представленої залежності на рисунку 4.1 та даних таблиці 4.5 дозволяє виявити нелінійний характер поведінки логістичної системи при зміні безпекових пріоритетів. При мінімальному значенні коефіцієнта  $E_3 = 1,0$  система орієнтується виключно на короткострокову економію, що призводить до формування двох довгих кільцевих маршрутів із максимальним рівнем консолідації вантажу. Проте такий план є вкрай чутливим до дестабілізуючих впливів воєнного стану, що підтверджується найнижчим індексом надійності  $P_s = 0,620$ . Це означає, що у 38 % випадків виконання доставки завершиться зривом часових вікон або потраплянням транспортних засобів у зони тривалого простою.

Поступове збільшення параметра  $E_3$  ініціює процес топологічного дроблення обертів та уникнення небезпечних сегментів дорожньої мережі. Фізичний пробіг транспортних засобів монотонно зростає, що обумовлює збільшення операційних витрат  $C_{op}$ . Величина додаткових витрат на страхування від воєнних ризиків визначається як ціна робастності  $PoR$  і розраховується як відсоткове відношення приросту операційних витрат до їх базового детермінованого значення.

Незважаючи на зростання ціни робастності, Сумарна узагальнена вартість  $Z$ , яка інтегрує прямі витрати та потенційні збитки, поводить себе немонотонно. На інтервалі  $E_3 \in [1,0; 2,0]$  спостерігається стійка тенденція до зниження  $Z$  від 6769,50 грн до свого глобального мінімуму на рівні 5259,50 грн. Цей ефект пояснюється тим, що темпи зниження очікуваних збитків від ризиків (з 3840 грн до 1420 грн) суттєво випереджають темпи зростання операційних витрат, що обумовлено превентивним виведенням транспортних засобів із зон високої вразливості та скороченням часу їх перебування на маршруті.

Точка  $E_3 = 2,0$  є раціональним компромісним оптимумом (точкою зламу на фронті Парето), де досягається високий рівень надійності  $P_s = 0,910$  при мінімальній сумарній узагальненій вартості. Подальше збільшення

коефіцієнта  $E_3 > 2,0$  переводить систему в режим гіперконсервативного планування. На цьому етапі приріст надійності є незначним (лише 6,5 % при переході від  $E_3 = 2,0$  до  $E_3 = 3,0$  , тоді як операційні витрати зростають експоненціально через необхідність використання надміру довгих об'їзних шляхів, що робить такі рішення економічно неефективними в довгостроковій перспективі.

Повітряні тривоги є головним джерелом темпоральної невизначеності логістичного процесу в місті Харків. Вони зумовлюють вимушений простій транспортних засобів та персоналу в безпечних зонах відстою, що генерує значні додаткові витрати, які залежать від тривалості простою. Математичне очікування темпоральних збитків для одного рейсу безпосередньо залежить від тривалості перебування ТЗ на лінії, що робить довгі маршрути критично вразливими при зростанні інтенсивності загроз.

Для оцінки стійкості розробленої робастної моделі проведено порівняльний аналіз чутливості двох стратегій планування – класичної  $E_3 = 1,0$  та робастної  $E_3 = 2,0$  – до зміни середньої інтенсивності повітряних тривог  $\lambda$  в межах від 0,05 до 0,40 тривог на годину. Результати моделювання наведено в таблиці 4.6.

Таблиця 4.6 – Вплив інтенсивності повітряних на надійність та вартість доставки за різними стратегіями планування

Інтенсивність тривог, тривог/год	Класична модель	Робастна модель	Відхилення сумарної узагальненої вартості, %
0,05 (низький ризик)	–	–	–
Сумарна узагальнена вартість, грн	3840,50	4177,50	+8,77%
Надійність	0,895	0,970	+8,38%
0,10 (помірний ризик)	–	–	–
Сумарна узагальнена вартість, грн	4670	4515	-3,32%
Надійність	0,810	0,950	+17,28%

Продовження таблиці 4.6

Інтенсивність тривоги, тривоги/год	Класична модель	Робастна модель	Відхилення сумарної узагальненої вартості, %
0,21 (базовий рівень 2025 р.)	–	–	–
Сумарна узагальнена вартість, грн	6769,50	5259,50	-22,31%
Надійність	0,620	0,910	+46,77%
0,30 (високий рівень)	–	–	–
Сумарна узагальнена вартість, грн	8480,00	5870,00	-30,78%
Надійність	0,480	0,865	+80,21%
0,40 (критичний рівень)	–	–	–
Сумарна узагальнена вартість, грн	10450	6580	-37,03%
Надійність	0,340	0,810	+138,24%

Для графічного аналізу процесу деградації надійності при зміні темпоральних параметрів воєнних загроз побудовано відповідні графіки чутливості (рис. 4.2).

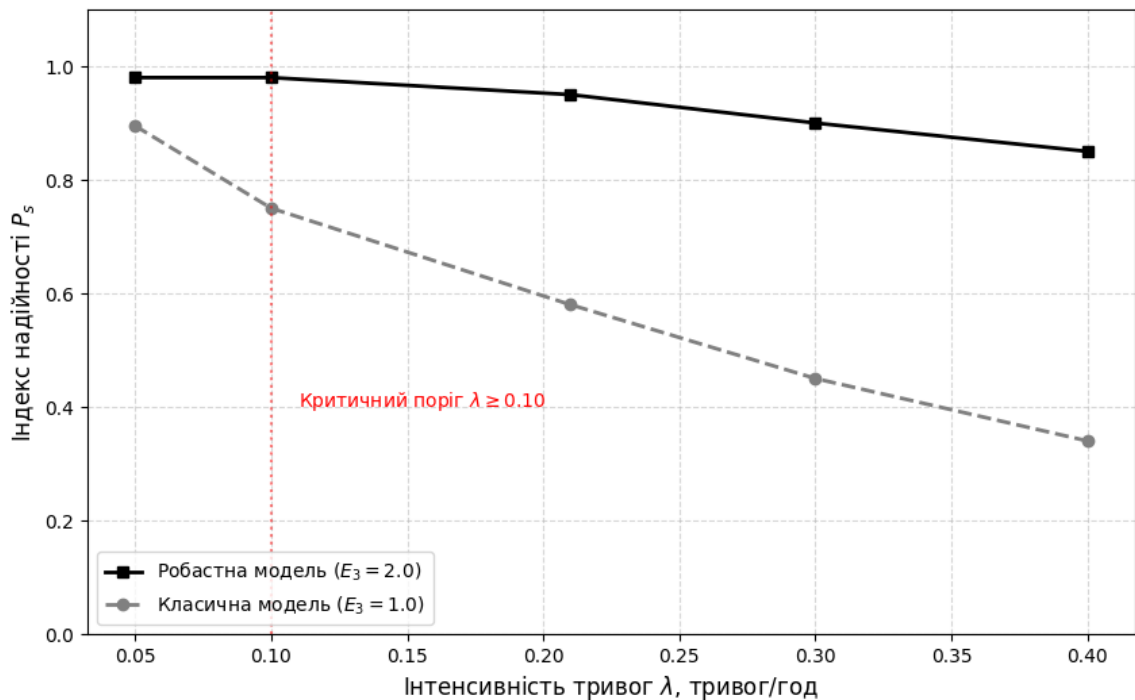


Рисунок 4.2 – Чутливість індексу надійності доставки до інтенсивності воєнних загроз

Представлені на рисунку 4.2 криві вказують на кардинальну різницю у характері деградації надійності двох порівнюваних систем під впливом зростання темпорального тиску. При низькій інтенсивності загроз  $\lambda = 0,05$  використання класичної моделі є економічно виправданим, оскільки вона забезпечує меншу сумарну узагальнену вартість при прийнятному рівні надійності  $P_s = 0,895$ . У цьому стані ціна робастності перевищує значення очікуваних збитків від вимушеного простою. Проте при переході через критичний поріг інтенсивності тривоги  $\lambda \geq 0,10$  ситуація змінюється. Класичні маршрути починають стрімко втрачати свою ефективність. При критичному рівні загроз  $\lambda = 0,40$  індекс надійності класичного плану падає до 0,340, а сумарна узагальнена вартість зростає до 10450 грн через лавиноподібне запізнення транспортних засобів під час рейсів. Такі затримки в гуманітарному розрізі еквівалентні стрімкому зростанню деградації якості обслуговування, що в екстремальних сценаріях може призводити до соціальних колапсів.

Робастна модель демонструє високу життєздатність за рахунок превентивної зміни структури маршрутів. Математичний очікуваний час перебування автомобіля на одному рейсі мінімізується шляхом поділу клієнтської мережі на локальні сегменти, що математично описується як мінімізація часової експозиції ризику. Робастне резервування часових буферів та використання альтернативних сегментів мережі дозволяє нівелювати затримки. Навіть при критичній інтенсивності тривоги  $\lambda = 0,40$ , робастний план зберігає працездатність із показником надійності  $P_s = 0,810$ , забезпечуючи при цьому економію сумарної узагальненої вартості на рівні 37% порівняно з детермінованим аналогом.

Ефективність функціонування транспортної системи та її здатність адаптуватися до ризиків воєнного стану залежить не лише від зовнішніх безпекових факторів, а й від внутрішніх параметрів, таких як жорсткість обмежень вантажопідйомності гетерогенного парку транспортних засобів.

При плануванні доставки вантажів в умовах руйнування дорожньої інфраструктури, коефіцієнт використання вантажопідйомності безпосередньо впливає на гнучкість маршрутизації та паливну ефективність, яка оцінюється через модель паливної ефективності з урахуванням завантаженості ТЗ.

Для оцінки цього впливу проведено серію експериментів, у яких варіювався ступінь завантаженості парку за допомогою зміни середнього попиту клієнтів при фіксованій номінальній вантажопідйомності автомобілів. Визначався показник рівня завантаженості усього наявного парку транспортних засобів (гетерогенного парку), як відношення сумарного попиту  $D$  до загальної вантажності парку  $Q$

$$R_z = \frac{D}{Q}. \quad (4.7)$$

Рівень завантаженості це безрозмірний інтегральний показник, це характеристика дефіциту ресурсів системи в цілому. Якщо парк рухомого складу складається з різних авто (наприклад, 2 т, 5 т та 10 т), то  $Q$  це сума їхніх спроможностей. Якщо значення  $R_z$  низьке  $R_z \approx 0,35$  то система має величезний надлишок вантажопідйомності (резерв). Можливо легко перекидати вантаж між машинами, змінювати маршрути або об'їжджати зруйновані ділянки. Високе значення  $R_z \approx 0,85$  визначає, що система працює на межі можливостей. Авто завантажені майже повністю. Будь-яке руйнування інфраструктури або зміна маршруту призведе до неможливості виконати замовлення, оскільки «зайвого» місця в інших машинах немає.

При низькому значенні рівня завантаження навіть класичні моделі працюють стабільно. При високому значенні різко зростає роль робастної оптимізації. Надійна модель дозволяє знайти рішення там, де класична модель не працює через неможливість дотриматися графіка в умовах блокування доріг.

Показник рівня завантаження є мірою стратегічного резерву системи. Чим вище це значення, тим менше простору для маневру при використанні класичної моделі, оскільки кожен додатковий кілометр об'їзду на перевантаженому авто критично збільшує витрату палива та ризик невиконання замовлення.

Результати чутливості системи до зміни відношення сумарного попиту до загальної пропускної здатності парку  $D/Q$  представлено в таблиці 4.7.

Таблиця 4.7 – Чутливість показників ефективності та робастності до жорсткості обмежень вантажопідйомності

Рівень завантаженості	Кількість задіяних ТЗ	Операційні витрати, грн	Середній коефіцієнт заповнення ТЗ	Середній час рейсу, год	Індекс надійності	Очікувані збитки від ризиків, грн
0,35 (вільно)	–	–	–	–	–	–
Класична модель	2	2450	0,38	1,45	0,820	1240
Робастна модель	3	3150	0,28	1,12	0,955	520
0,55 (помірно)	–	–	–	–	–	–
Класична модель	2	2929,50	0,55	2,12	0,620	3840
Робастна модель	3	3839,50	0,37	1,48	0,910	1420
0,85 (жорстко)	–	–	–	–	–	–
Класична модель	2	3450	0,82	2,85	0,420	5620
Робастна модель	4	5210	0,46	1,95	0,830	2450

Для побудови повноцінного аналітичного висновку щодо спільного впливу внутрішніх та зовнішніх параметрів розроблено двовимірну координатну сітку відгуку (табл. 4.8), що відображає трьохвимірну поверхню індексу надійності доставки  $P_s = f(R_3, E_3)$ .

Таблиця 4.8 – Координатна сітка 3D-поверхні індексу надійності

Рівень завантаженості	Коефіцієнт критичності загрози			
	1,0	1,5	2,0	2,5
0,35	0,820	0,915	0,955	0,970
0,55	0,620	0,792	0,910	0,952
0,85	0,420	0,650	0,830	0,880

Візуалізація представленої поверхні відгуку виконана у просторовій аксонометричній проекції (рис. 4.3).

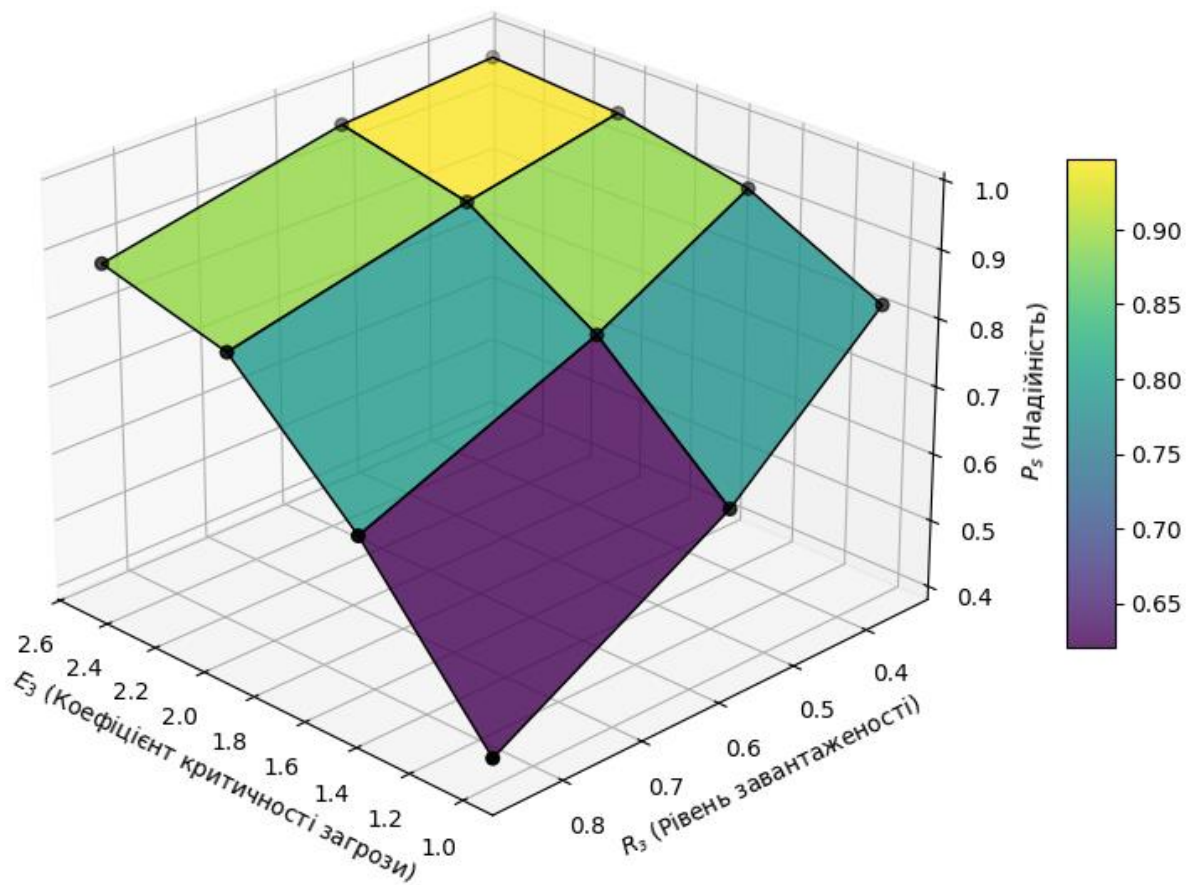


Рисунок 4.3 – Трьохвимірна поверхня відгуку індексу надійності доставки залежно від коефіцієнта критичності загрози та рівня завантаженості

Аналіз представленої тривимірної поверхні на рисунку 4.3 та даних таблиць 4.7 і 4.8 свідчить про наявність вираженого системного взаємозв'язку між ступенем заповнення транспортних засобів та загальною робастністю

логістичного плану. За умов низької жорсткості обмежень  $R_3 = 0,35$ , система має значний внутрішній резерв вантажопідйомності. Це дозволяє як класичній, так і робастній моделям демонструвати відносно високі показники надійності, оскільки алгоритм оптимізації може вільно перерозподіляти замовлення між транспортними засобами, створюючи короткі та безпечні маршрути без залучення значної кількості додаткових ТЗ.

У ситуації помірної жорсткості  $R_3 = 0,55$  робастна модель свідомо йде на зниження середнього коефіцієнта заповнення автомобілів (з 0,55 до 0,37) та залучає третій транспортний засіб. Така деконсолідація вантажів є раціональним механізмом самоорганізації складної системи – зменшення завантаженості окремих автомобілів дозволяє скоротити довжину їхніх індивідуальних рейсів та уникнути тривалого перебування в небезпечних зонах міста, що забезпечує зростання надійності доставки  $P_s$  з 0,620 до 0,910.

При жорстких обмеженнях  $R_3 = 0,85$ , коли пропускна здатність парку використовується майже повністю, класична модель демонструє критичне падіння надійності до  $P_s = 0,420$ , а очікувані збитки від ризиків сягають 5620 грн. У цьому стані робастна модель змушена залучати вже 4 транспортних засоби, що призводить до різкого зростання операційних витрат до 5210 грн.

Це підтверджує тезу про те, що за умов високої жорсткості обмежень вантажопідйомності логістична система втрачає свою адаптивність, оскільки вільна ємність автомобілів більше не може використовуватися як буфер для поглинання просторово-темпоральних збурень воєнного стану.

#### 4.3 Розрахунок очікуваного соціально-економічного ефекту та рекомендації щодо впровадження результатів дослідження

Практична реалізація розроблених у дисертаційному дослідженні теоретичних і методичних рішень спрямована на фундаментальну перебудову

логістичного управління процесом доставки вантажів у міських умовах під впливом екстремальної нестабільності. Традиційні парадигми оптимізації, орієнтовані на концепції ощадливого виробництва та доставку «точно в строк», в умовах перманентних воєнних загроз демонструють критичну вразливість, що призводить до каскадних відмов ланцюгів постачання та значних фінансових збитків.

Оцінювання очікуваного соціально-економічного ефекту від впровадження розробленого науково-методичного апарату базується на інтеграції класичних критеріїв економічної оптимальності з показниками ризик-орієнтованої стійкості, безпеки праці та гуманітарної стабільності міської екосистеми.

Оцінювання ефективності логістичних систем у кризових умовах вимагає врахування високого ступеня як комерційної, так і безпекової невизначеності. Україна характеризується високим рівнем воєнних загроз, що підтверджується міжнародними індексами безпеки, зокрема індексом INFORM, який класифікує гуманітарну ситуацію в країні як надзвичайно складну. За даними Європейської Бізнес Асоціації, на початку 2026 року лише 76 % підприємств мають змогу функціонувати в повному обсязі, тоді як 24 % змушені працювати з жорсткими обмеженнями, де серед головних бар'єрів 45 % керівників виділяють систематичне призупинення діяльності на час повітряних тривог/

Для кількісного виміру вразливості логістичних мереж у вітчизняній та світовій практиці застосовують спеціалізовані метрики, такі як індекс ризику ланцюга постачання та індекс ризику збоїв постачання. У межах даного дослідження запропоновано робастну модель маршрутизації гетерогенного парку транспортних засобів, яка трансформує ймовірнісні збої воєнного стану у вартісні штрафи дуг транспортного графу. Це дозволяє превентивно формувати «безпековий каркас» міської логістичної мережі, мінімізуючи сумарну узагальнену вартість, що складається з прямих операційних видатків та монетизованих ризиків.

Вплив повітряних тривог та локальних руйнувань інфраструктури на економіку є колосальним. За оцінками провідних економістів, збитки ВВП України від масштабних повітряних тривог, що тривають упродовж робочого дня, становлять від 7,5 до 9 мільярдів гривень за одну добу вимушеного простою [101]. При цьому чисті втрати зведеного бюджету та пенсійного фонду через зупинення економічної активності оцінюються у 3 мільярди гривень на добу. За таких умов розробка математичних моделей, здатних мінімізувати час простою комерційного транспорту та забезпечити безперервність поставок, є стратегічним завданням національного рівня.

Розрахунок прямого економічного ефекту базується на порівнянні результатів моделювання транспортного процесу за класичною детермінованою моделлю та розробленою робастною моделлю маршрутизації в умовах міста Харків. Харківський регіон протягом 2025–2026 років демонструє найвищу інтенсивність воєнних загроз в Україні. Зокрема, у 2025 році в області зафіксовано 2020 сигналів повітряної тривоги. Безпосередньо у місті Харків пролунало 1826 тривог загальною тривалістю 2590 годин 56 хвилин, що еквівалентно приблизно 108 добам безперервної небезпеки [102].

На основі розробленого симуляційно-евристичного алгоритму, що поєднує метод адаптивного пошуку (ALNS) та імітаційне моделювання Монте-Карло (1000 ітерацій для кожного рішення), проведено порівняльний аналіз двох стратегій організації перевезень (на основі контрольного прикладу). Перша стратегія базується на класичній детермінованій моделі (орієнтація на мінімальний фізичний пробіг без врахування ризиків), друга – на робастній моделі зі стратегічним коефіцієнтом критичності загрози  $E_3 = 2,0$ , що формує стійкий безпековий каркас. Порівняльні показники ефективності двох моделей представлено в таблиці 4.9.

Таблиця 4.9 – Показники порівняльної ефективності моделей організації доставки вантажів

Логістичний показник	Класична модель	Робастна модель	Абсолютна зміна	Відносна зміна, %
Сумарний пробіг автопарку, км	83,70	109,70	+26,00	+31,1
Прямі операційні витрати, грн	2929,50	3839,50	+910,00	+31,1
Очікувані втрати від темпоральних та топологічних ризиків, грн	3840,00	1420,00	-2420,00	-63,0
Сумарна узагальнена вартість, грн	6769,50	5259,50	-1510,00	-22,3
Коефіцієнт варіації вартості	0,32	0,14	-0,18	-56,3
Індекс надійності виконання плану	0,62	0,91	+0,29	+46,8

Аналіз результатів доводить, що класична модель мінімізує пробіг до 83,7 км шляхом утворення двох довгих розвізних маршрутів. Проте тривале знаходження автомобілів на лінії призводить до високої чутливості до сигналів тривоги та блокувань, що викликає очікувані втрати у розмірі 3840 грн за один операційний цикл та знижує надійність доставки до критичного рівня  $P_s = 0,62$ . Робастна модель свідомо збільшує номінальний пробіг на 31,1 % (до 109,7 км) за рахунок дроблення рейсів на коротші петлі та використання безпечних об'їзних доріг. Це призводить до зростання операційних витрат на 910,00 грн (фізична ціна робастності). Однак очікувані втрати від воєнних ризиків скорочуються на 63,0 % (до 1420 грн), оскільки суттєво зменшується час знаходження кожного автомобіля в зоні потенційного впливу загрози. Сумарна узагальнена вартість  $Z$  зменшуються на 22,3 %, а індекс надійності стабілізується на рівні 91,0 %.

Для оцінювання інтегрального ефекту виконано масштабування результатів контрольного прикладу на діяльність середнього логістичного оператора, що здійснює обслуговування торговельних мереж у Харкові за наступних умов – чисельність рухомого складу вантажністю 5 тон  $A = 50$  автомобілів. Середня кількість рейсів на один автомобіль протягом доби  $N_{об} = 2$ . Кількість робочих днів підприємства на рік  $D = 300$  днів.

Добовий економічний ефект для всього автопарку розраховується

$$\Delta E_{\text{доб}} = A \cdot N_{\text{об}} \cdot (Z_{\text{classic}} - Z_{\text{robust}}), \quad (4.8)$$

$$\Delta E_{\text{доб}} = 50 \cdot 2 \cdot (6769,50 - 5259,50) = 151000,00 \text{ грн/добу}.$$

Очікуваний місячний економічний ефект розраховується за 30 днів та складе

$$\Delta E_{\text{міс}} = 151000,00 \cdot 30 = 4530000,00 \text{ грн/міс}.$$

Річний інтегральний економічний ефект від впровадження системи робастного планування

$$\Delta E_{\text{рік}} = 151000,00 \cdot 300 = 45300000,00 \text{ грн/рік}.$$

Дані розрахунки свідчать про те, що масштабне впровадження робастних моделей дозволяє логістичному підприємству економити понад 45,3 млн грн на рік за рахунок превентивного управління ризиками та запобігання тривалим простоям. При цьому капітальні інвестиції, необхідні для придбання обчислювальної техніки, розгортання програмного комплексу Python та навчання персоналу, оцінюються у 450000 грн.

Окрім прямого економічного результату, впровадження результатів дослідження супроводжується значним соціально-економічним та гуманітарним ефектом, який безпосередньо впливає на стійкість міського середовища та збереження людського потенціалу.

Регулювання режиму праці та відпочинку водіїв комерційного транспорту в Україні зазнало суттєвих змін з метою гармонізації національного законодавства з європейськими стандартами безпеки. Чітке дотримання Наказу № 1727 Міністерства інфраструктури, що встановлює жорсткі обмеження на тривалість безперервного керування та вимоги до

обов'язкового відпочинку, є критичним для профілактики професійного вигорання та зниження аварійності на дорогах.

В умовах воєнного стану в Харкові водії піддаються надзвичайному психоемоційному стресу, що підвищує ризик виникнення дорожньо-транспортних пригод. Використання класичних довгих рейсів призводить до того, що раптове оголошення повітряної тривоги змушує водіїв здійснювати незаплановані зупинки у випадкових місцях або продовжувати рух із порушенням правил безпеки. Робастна модель превентивно резервує тимчасові буфери у графіках доставки, що дозволяє водіям гарантовано дістатися найближчого укриття без порушення термінів виконання контрактів.

Для впровадження розроблених наукових рішень в реальну операційну діяльність диспетчерських центрів та транспортних підприємств розроблено детальну інженерно-експлуатаційну методика. Методика описує повний технологічний цикл – від збору первинної інформації до коригування планів доставки в умовах повітряних тривог та дорожніх блокувань.

Етап 1. Налаштування параметрів автопарку та констант витрат, логіст відкриває вкладку «Автомобілі» розробленого програмного комплексу. У табличну форму вносяться технічні характеристики наявних ТЗ – унікальний ідентифікатор, номінальна вантажопідйомність (тонни) та середня технічна швидкість з урахуванням міського трафіку та блокпостів. У блоці економічних параметрів задаються змінні операційні витрати на кілометр пробігу та вартість години роботи водія, що дозволяє автоматизувати розрахунок базової собівартості.

Етап 2. Формування матриці клієнтів та відстаней, на вкладці «Пункти та відстані» користувач задає кількість точок доставки. Система автоматично генерує симетричну матрицю відстаней та таблицю попиту клієнтів. Логіст вводить відстані між пунктами на основі даних комерційних навігаційних сервісів (Google Maps, OpenStreetMap) та зазначає детермінований обсяг поставки для кожного одержувача.

Етап 3. Розрахунок та параметризація воєнних ризиків, на вкладці «Аналіз воєнних Ризиків» здійснюється інтеграція безпекових параметрів. Задається інтенсивність повітряних тривог та очікувана тривалість однієї затримки на основі офіційного моніторингу ДСНС. Вводиться просторова ймовірність блокування дуг дорожньої мережі, імпортована з ГІС-карти KDE. Задаються витрати на найкоротший об'їзд для кожної дуги. Логіст встановлює коефіцієнта критичності загрози відповідно до поточної оперативної ситуації.

Етап 4. Оптимізація та верифікація плану, після натискання кнопки «Розв'язати» на вкладці «Маршрути» оптимізаційний рушій, використовуючи алгоритм Кларка-Райта та метод ALNS, будує раціональні маршрутні схеми, які автоматично розподіляються між транспортними засобами з урахуванням обмеження їх вантажопідйомності. Побудований план проходить імітаційне тестування Монте-Карло, яке симулює 1000 випадкових реалізацій повітряних тривог та блокувань доріг за законом Пуассона. Результатом розрахунку є детальний план-графік руху для кожного ТЗ, який відображається на вкладці «Результати». Він містить часові відмітки прибуття до клієнтів, обсяг вантажу та інтегральний індекс надійності.

Практична реалізація розробленої робастної моделі на рівні суб'єктів логістичного ринку потребує насамперед архітектурної трансформації складської інфраструктури, що полягає у відмові від надмірної концентрації ресурсів на користь децентралізованої мережі мікрохабів. Такий підхід дозволяє суттєво оптимізувати процес доставки на етапі «останньої милі», скорочуючи час перебування транспортних засобів у зонах потенційного ураження та мінімізуючи часову експозицію ризиків. Доповненням до технічних заходів має стати впровадження механізмів динамічного ціноутворення, які враховують кількісну оцінку вартості воєнного ризику для конкретних районів міста, а також обов'язкове резервування часових буферів у графіках руху для забезпечення персоналу можливості гарантованого доступу до укриттів.

На рівні муніципального управління та служб цивільного захисту ключова роль відводиться формуванню сприятливого цифрового середовища в межах загальної концепції Smart City. Пріоритетним завданням є розробка інтегрованих платформ для автоматизованого обміну геопросторовими даними про інциденти, що дозволить логістичним операторам миттєво оновлювати параметри «безпекового каркаса» міста та адаптувати маршрути до поточного стану інфраструктури. Окрім цифрової інтеграції, муніципальні органи мають сприяти використанню малогабаритного та екологічного транспорту, який в умовах робастного планування та ймовірних інфраструктурних завалів демонструє вищу маневреність і стійкість порівняно з традиційними вантажними автомобілями. Синергія цих заходів дозволяє трансформувати міську логістику у стійку екосистему, здатну функціонувати в умовах високої невизначеності.

#### 4.4 Висновок за розділом

За результатами планування та проведення багатофакторного експерименту встановлено, що традиційні концепції логістики, орієнтовані суто на мінімізацію пробігу, в умовах воєнного стану демонструють критичну вразливість із низьким індексом надійності (0,72). Отримане лінійне рівняння регресії підтвердило домінуючий вплив територіального чинника на зростання сумарної узагальненої вартості, де фізичне розташування пунктів доставки в небезпечних зонах є головним детермінантом економічної ефективності. Доведено, що формування «безпекового каркаса» дозволяє стабілізувати надійність виконання денного завдання на рівні 0,94, що підтверджено статистичною значущістю коефіцієнтів за критеріями Стьюдента та Фішера.

Дослідження впливу вхідних параметрів виявило нелінійний характер поведінки логістичної системи, при збільшенні коефіцієнта критичності загрози сумарна узагальнена вартість поводитьсь немонотонно, досягаючи глобального мінімуму при раціональному компромісі між операційними

видатками та ризиковими збитками. Встановлено, що робастна модель зберігає працездатність навіть при критичній інтенсивності повітряних тривоги, тоді як класичні маршрути стрімко втрачають ефективність через лавиноподібне запізнення транспортних засобів. Також виявлено системний взаємозв'язок між рівнем завантаженості парку та робастністю, при жорстких обмеженнях вантажопідйомності система втрачає адаптивність, оскільки вільна ємність автомобілів більше не може слугувати буфером для поглинання просторово-темпоральних збурень.

Розрахунок соціально-економічного ефекту довів, що впровадження робастного планування дозволяє середньому логістичному оператору економити понад 45,3 млн грн на рік за рахунок скорочення очікуваних втрат від воєнних ризиків на 63 %. Крім суто фінансових переваг, перехід до стратегії «безпекового каркаса» забезпечує зниження індексу експозиції персоналу до ризику на 40–60 %, що є критично важливим для збереження життів водіїв та експедиторів. Для практичної реалізації результатів рекомендовано архітектурну трансформацію складської інфраструктури у децентралізовану мережу мікрохабів та формування єдиного цифрового простору в межах концепції Smart City для оперативного обміну геопросторовими даними про інциденти.

## ВИСНОВКИ

На основі критичного аналізу сучасного стану теорії та практики встановлено, що існуючі моделі міської логістики, орієнтовані на концепції «Just-in-Time» та мінімізацію операційних витрат, виявляються неспроможними в умовах високої невизначеності та воєнних загроз. Доведено, що цифрова трансформація в межах «Логістики 4.0» створює необхідний базис для прозорості ланцюгів постачань, проте потребує адаптації під специфічні чинники українського ринку – руйнування інфраструктури та ризику блокування транспортних артерій. Обґрунтовано наукову необхідність переходу від детермінованих моделей планування до робастних підходів, де пріоритетом стає не лише економічна вигода, а й системна стійкість та здатність логістичної системи до самовідновлення після зовнішніх впливів.

Запропоновано теоретико-методологічний підхід до розгляду міської вантажної логістики як складної адаптивної системи, що дозволило формалізувати процеси доставки в умовах динамічної зміни безпекового середовища. Розроблено математичну модель маршрутизації, яка, на відміну від класичних аналогів, інтегрує «воєнний чинник» через дворівневу структуру ризиків: темпоральні (затримки через тривоги) та топологічні (ризик непроїзду ділянок). Сформована концепція «безпекового каркаса» транспортної мережі дозволяє математично обґрунтувати вибір альтернативних маршрутів, мінімізуючи сукупні очікувані втрати та забезпечуючи стабільність логістичних потоків навіть при частковому руйнуванні міської інфраструктури.

Розроблено та програмно реалізовано симуляційно-евристичний алгоритм, який поєднує потужність генетичних методів оптимізації топології з імітаційним моделюванням методом Монте-Карло для оцінки стохастичної надійності планів. Створена система підтримки прийняття рішень мовою Python дозволяє автоматизувати процес динамічного перерахунку маршрутів у реальному часі на основі геопросторових даних про інциденти. Апробація

розробленого інструментарію на реальній транспортній мережі м. Харкова підтвердила його високу ефективність. Встановлено можливість підвищення індексу надійності доставки з 0,62 до 0,91, що супроводжується зниженням сумарної узагальненої вартості на 22 % за рахунок уникнення ризикових збитків.

За результатами багатофакторного експерименту та регресійного аналізу доведено статистичну значущість впливу безпекових чинників на ефективність логістичного управління. Встановлено, що впровадження результатів дослідження забезпечує значний соціально-економічний ефект: річна економія для логістичного оператора середнього масштабу складає понад 45,3 млн грн, а зниження експозиції персоналу до воєнних ризиків на 40–60 % демонструє високу гуманітарну цінність запропонованих рішень. Практичні рекомендації щодо децентралізації складської інфраструктури та створення мережі мікрохабів у поєднанні з технологіями Smart City складають підґрунтя для розробки стратегій логістичного розвитку міст у поствоєнний період.

**СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ**

1. Strategies for Developing Logistics Centres: Technological Trends and Policy Implications / M. D. Nguyen et al. *Polish Maritime Research*. 2023. Vol. 30, no. 4. P. 129–147. DOI: <https://doi.org/10.2478/pomr-2023-0066>.
2. Aldoseri A., Al-Khalifa K. N., Hamouda A. M. AI-Powered Innovation in Digital Transformation: Key Pillars and Industry Impact. *Sustainability*. 2024. Vol. 16, no. 5. P. 1790. DOI: <https://doi.org/10.3390/su16051790>.
3. Gyarmathy A., Perényi Á., Mesek M. Examining the use of Industry 4.0 technologies in e-commerce supply chains: a model of antecedents and outcomes of data-sharing platform applications. *Supply Chain Management: An International Journal*. 2025. Vol. 30, no. 3. P. 383–407. DOI: <https://doi.org/10.1108/scm-08-2024-0489>.
4. Supply Chain Integration Barriers to Port-Centric Logistics – An Emerging Economy Perspective / Venkatesh et al. *Transportation Journal*. 2020. Vol. 59, no. 3. P. 215. DOI: <https://doi.org/10.5325/transportationj.59.3.0215>.
5. Nitsche A.-M., Kusturica W. Modelling Advanced Technology Integration for Supply Chains. *24th International Conference on Enterprise Information Systems (25–27 April 2022)*. 2022. DOI: <https://doi.org/10.5220/0010969400003179>.
6. Boldizsár A., Török Á., Szander N. Examining the Application Possibilities and Economic Issues of an Alternative Drive Chain in Hungary: Scenario Analysis. *Logistics*. 2025. Vol. 9, no. 2. P. 77. DOI: <https://doi.org/10.3390/logistics9020077>.
7. Amirgholy M., Shahabi M., Gao H. O. Optimal design of sustainable transit systems in congested urban networks: A macroscopic approach. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*. 2017. Vol. 103. P. 261–285.

8. Wang J., Chi L., Hu X., Zhou H. Urban traffic congestion pricing model with the consideration of carbon emissions cost. *Sustainability*. 2014. Vol. 6, no. 2. P. 676–691.
9. Вороніна Р. М., Маргіта Н. О., Карий О. І. Концептуальні засади міської логістики. *Вісник Національного університету Львівська політехніка. Логістика*, (811), , Львів, 2014, С. 49-55.
10. Rai H. B., Verlinde S., Macharis C. Shipping outside the box. Environmental impact and stakeholder analysis of a crowd logistics platform in Belgium. *Journal of Cleaner Production*. 2018. Vol. 202. P. 806–816.
11. Галкін А. С., Грекова О. О. Сталий розвиток транспорту як запорука переходу до концепції розумне місто. *Сучасні технології та перспективи розвитку автомобільного транспорту : збірник наукових праць XIV міжнародної науково-практичної конференції (Вінниця, 25-27 жовтня 2021 року)*. Вінниця : ВНТУ, 2021. С. 64–67.
12. Russo F., Comi A. Investigating the Effects of City Logistics Measures on the Economy of the City. *Sustainability*. 2020. Vol. 12, no. 4. P. 1439. DOI: <https://doi.org/10.3390/su12041439>.
13. Holguín-Veras J., Leal J. A., Sánchez-Díaz I., Browne M., Wojtowicz J. State of the art and practice of urban freight management Part I: Infrastructure, vehicle-related, and traffic operations. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*. 2019. Vol. 137. P. 360–382.
14. Russo F., Comi A. From city logistics theories to city logistics planning. *City Logistics 3 — Towards Sustainability and Liveable Cities* / eds. E. Taniguchi, R. G. Thompson. London : ISTE Ltd., John Wiley and Sons, 2018. P. 329–348.
15. Ольхова М. В., Рославцев Д. М. Оцінювання заходів міської логістики: моделювання потоку вантажних транспортних засобів : монографія. Харків : Харківський національний університет міського господарства імені О. М. Бекетова, 2021.

16. Browne M., Allen J., Nemoto T., Patier D., Visser J. Reducing Social and Environmental Impacts of Urban Freight Transport: A Review of Some Major Cities. *Procedia – Social And Behavioral Sciences*. 2012. Vol. 39. P. 19–33.
17. Sdoukopoulos A., Pitsiava-Latinopoulou M., Basbas S., Papaioannou P. Measuring progress towards transport sustainability through indicators: Analysis and metrics of the main indicator initiatives. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*. 2019. Vol. 67. P. 316–333.
18. Loo B., Tsoi K. H. The sustainable transport pathway: A holistic strategy of Five Transformations. *Journal of Transport and Land Use*. 2018. Vol. 11. P. 961–980.
19. Саєнсує М. А. Основні напрями сталої логістики: вимір впливу на навколишнє середовище. *Вчені записки*. 2018. Вип. 29.
20. Лігоненко Л. О., Яковчук В. В. Соціально-екологічні наслідки розвитку логістичної сфери та шляхи їх вирішення на засадах концепції «зеленої» логістики. *Topical issues of modern science, society and education : Proceedings of the 7th International scientific and practical conference (Kharkiv, January 29–31, 2022)*. Kharkiv : SPC "Sci-conf.com.ua", 2022. P. 1698.
21. Melnikova, N., & Yanchenko, N. (2019). The Analysis of the Interpretation and the Essence of Green Logistics. *Social Economics*, 56, 183-189. DOI: <https://doi.org/10.26565/2524-2547-2018-56-18>.
22. Скупейко В. В., Завальницька Н. Б., Струк Н. Р. «Зелена» логістика: понятійний апарат. *Науковий вісник Полтавського університету економіки і торгівлі. Серія «Економічні науки»*. 2022. № 1 (105). С. 169–174.
23. Rakhmangulov A., Sladkowski A., Osintsev N., Muravev D. Green logistics: Element of the sustainable development concept. Part 1. *Naše more: znanstveni časopis za more i pomorstvo*. 2017. Vol. 64, no. 3. P. 120–126. DOI: <https://doi.org/10.17818/NM/2017/3.7>.

24. Школьніий О. О. Розвиток «зеленої» логістики в контексті вдосконалення управління ланцюгами поставок. *Механізми економічного розвитку*. 2018. № 9. С. 112.
25. Сало Я. «Зелена» логістика в Україні: проблеми та перспективи. *Економіка та суспільство*. 2023. Вип. 47. DOI: <https://doi.org/10.32782/2524-0072/2023-47-58>.
26. Гуржій Н. М., Белікова М. Ю. Впровадження екологістики у вітчизняну транспортну систему. *Науковий вісник Херсонського державного університету*. 2016. № 17 (1). С. 96–99.
27. Жарська І. О., Марчук І. С. Екологічні аспекти логістичної діяльності на засадах сталого розвитку. *Науковий вісник Одеського національного економічного університету : збірник наукових праць*. 2022. № 9-10 (298-299). С. 110–117. DOI: 10.32680/2409-9260-2022-9-10-298-299-110-117.
28. Paskannaya T., Shaban G. Innovations in green logistics in smart cities: USA and EU experience. *Marketing and Management of Innovations*. 2019. Vol. 1. P. 173–181. DOI: <https://doi.org/10.21272/mmi.2019.1-14>.
29. Jefimovaitė L., Vienažindienė M. Modeling the implementation of green logistics principles: theoretical aspect. *Public Security and Public Order*. 2021. Vol. 26.
30. Jarašūnienė A., Bazaras D. The implementation of green logistics in road transportation. *The Baltic Journal of Road and Bridge Engineering*. 2023. Vol. 18, no. 1. P. 185–207.
31. Temjanovski R., Jovanov T. Transforming freight mobility in the cities and promoting of green logistics. *Macedonian International Journal of Marketing*. 2020. Vol. 6, no. 11. P. 113–121.
32. Shramenko N., Merkisz-Guranowska A., Kiciński M., Shramenko V. Model of operational planning of freight transportation by tram as part of a green logistics system. *System*. 2022. Vol. 63, no. 3. P. 113–122. DOI: <https://doi.org/10.5604/01.3001.0015.9929>.

33. Сальніков Є. К., Калініченко О. П. Аналіз сучасних міських логістичних систем. *Напрями розвитку технологічної системи логістики в АПВ : збірник матеріалів IV Міжнародної науково-практичної інтернет-конференції (Харків, 20 квітня 2023 р.)*. Харків : ДБТУ, 2023. С. 69–72.
34. Pimentel, C., & Alvelos, F. (2018). Integrated urban freight logistics combining passenger and freight flows—mathematical model proposal. *Transportation research procedia*, 30, 80-89.
35. Masson, R., Trentini, A., Lehuédé, F., Malhéné, N., Péton, O., & Tlahig, H. (2017). Optimization of a city logistics transportation system with mixed passengers and goods. *EURO Journal on Transportation and Logistics*, 6(1), P. 81-109.
36. Bruzzone F., Cavallaro F., Nocera S. The integration of passenger and freight transport for first-last mile operations. *Transport Policy*. 2021. Vol. 100. P. 31–48.
37. Uyar A., Fernandes V., Kuzey C. The mediating role of corporate governance between public governance and logistics performance: International evidence. *Transport Policy*. 2021. Vol. 109. P. 37–47.
38. Овчаренко А. Г. Інтегрування управління якістю логістичних бізнес-процесів та екологічного менеджменту. *Innovations and prospects of world science : proceedings of the 2nd International scientific and practical conference (Vancouver, October 6–8, 2021)*. Vancouver : Perfect Publishing, 2021. P. 557.
39. Бойченко М. В. Зелена логістика вантажоперевезень: проблеми, шляхи вирішення. *Вістник економічної науки України*. 2021. № 2 (41). С. 152–155. DOI: [https://doi.org/10.37405/1729-7206.2021.2\(41\).152-155](https://doi.org/10.37405/1729-7206.2021.2(41).152-155).
40. Bányaı T. Real-time decision making in first mile and last mile logistics: How smart scheduling affects energy efficiency of hyperconnected supply chain solutions. *Energies*. 2018. Vol. 11, no. 7. Art. 1833.
41. Лубяний П. В., Розова А. Ю. Формування способів доставки дрібнопартійних товарів у логістичній системі роздрібної торговельної

мережі. *Вісник Херсонського національного технічного університету*. 2021. № 1 (76).

42. Загурський О. М. Консолідація вантажів як спосіб підвищення екологічності перевезень. *Автомобільний транспорт та інфраструктура : тези III Міжнародної науково-практичної конференції (Київ, 23–26 квітня 2020 року)*. Київ, 2020. С. 17.
43. Савченко Л. В., Гриценко С. І. Аналіз та класифікація можливих схем консолідованої доставки LTL вантажів. *Вісник економічної науки України*. 2020. № 2 (39). С. 139–144. DOI: [https://doi.org/10.37405/1729-7206.2020.2\(39\).139-144](https://doi.org/10.37405/1729-7206.2020.2(39).139-144).
44. Savchenko L., Lysenko M., Ihnatova A., Semeriahina M. Analysis of the features, difficulties and advantages of transportation of less-than-truck loads. *Management and Entrepreneurship: Trends of Development*. 2018. № 4 (06). P. 119–125. DOI: <https://doi.org/10.26661/2522-1566/2018-4/06-13>.
45. Вороніна Р. М. Міські логістичні центри як рішення для міської логістики. *Організаційний комітет: Голова оргкомітету*. 2016. С. 178.
46. Faccio M., Gamberi M. New city logistics paradigm: From the “last mile” to the “last 50 miles” sustainable distribution. *Sustainability*. 2015. Vol. 7, no. 11. P. 14873–14894. DOI: <https://doi.org/10.3390/su71114873>.
47. Hribernik M., Zero K., Kummer S., Herold D. M. City Logistics: Towards a Blockchain Decision Framework for Collaborative Parcel Deliveries in Micro-Hubs. *Transportation Research Interdisciplinary Perspectives*. 2020. Vol. 8. Art. 100274.
48. Lee K., Chae J., Kim J. A courier service with electric bicycles in an Urban Area: The case in Seoul. *Sustainability*. 2019. Vol. 11, no. 5. Art. 1255.
49. Naumov V., Starczewski J. Approach to simulations of goods deliveries with the use of cargo bicycles. *AIP Conference Proceedings*. Vol. 2078, no. 1. AIP Publishing LLC, 2019.
50. Holguín-Veras J. et al. State of the art and practice of urban freight management Part II: Financial approaches, logistics, and demand management.

*Transportation Research Part A: Policy and Practice*. 2020. Vol. 137. P. 383–410.

51. Katsela K., Pålsson H., Ivernå J. Environmental impact and costs of externalities of using urban consolidation centres: a 24-hour observation study with modelling in four scenarios. *International Journal of Logistics Research and Applications*. 2022. Vol. 25, no. 12. P. 1542–1563.
52. Олішевська В. Є., Олішевський Г. С. Потенціал і конкурентоспроможність електромобілів. *Проблеми та перспективи розвитку автомобільного транспорту : матеріали XI-ої Міжнародної науково-технічної інтернет-конференції*. Вінниця, 2023.
53. Ситник Д. Екологічні інновації у транспортній галузі. *Програмний комітет*. 2023. С. 430.
54. Внукова Н., Позднякова О. Комплексна оцінка впливу електромобілів на біосферу. *Грааль науки*. 2023. № 26. С. 208–214. DOI: <https://doi.org/10.36074/grail-of-science.14.04.2023.038>.
55. Гегедош К. В. Логістичні інформаційні складники в контексті маркетингових інтерактивних відносин: транскордонний аспект. *Науковий вісник Ужгородського національного університету. Серія: Міжнародні економічні відносини та світове господарство*. 2019. Вип. 23, ч. 1. С. 56–61.
56. Потапова Н., Зелінська О. В. Передумови виникнення та основні категорії інформаційної логістики. *Цифрова економіка як фактор інновацій та сталого розвитку суспільства : тези доповідей III Міжнародної науково-практичної конференції учених та студентів (15–16 листопада 2022 р.)*. 2022. С. 15–16.
57. Кудрявцева О. В. Особливості системи інформаційної логістики підприємства. *Економіка транспортного комплексу*. 2022. № 39. С. 115. DOI: <https://doi.org/10.30977/ЕТК.2225-2304.2022.39.115>.

58. Волонтир Л. О. Інформаційна логістика бізнес-структур малих підприємств. *Причорноморські економічні студії*. 2018. Вип. 34. С. 198–202.
59. Amirgholy M., Shahabi M., Gao H. O. Optimal design of sustainable transit systems in congested urban networks: A macroscopic approach. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*. 2017. Vol. 103. P. 261–285.
60. Gómez-Marín C. G., Serna-Urán C. A., Arango-Serna M. D., Comi A. Microsimulation-Based Collaboration Model for Urban Freight Transport. *IEEE Access*. 2020. Vol. 8. P. 182853–182867. DOI: 10.1109/ACCESS.2020.3028564.
61. Сватко В. В. Інтелектуальні методи та інформаційна технологія оптимізації процесів доставки вантажів у великих містах : дис. ... канд. техн. наук. Київ : Національний транспортний університет, 2021.
62. Трушкіна Н. В. Цифрова логістика як механізм розвитку регіональної транспортно-логістичної системи (на прикладі карпатського економічного району). *Економічні студії*. 2019. С. 161.
63. Колешня Я. О., Кравець А. І. Інтернет речей у логістиці. *Бізнес, інновації, менеджмент: проблеми та перспективи*. 2021. С. 262–263.
64. Бережна Н. Г., Волкова Т. В., Кутья О. В. Інтернет речей в транспортній системі. *Редакційна колегія: д. е. н., проф. Козирева О. В., д. е. н., проф. Сумець О. М., к. е. н., доц. Глебова Н. В.*. 2020. С. 411.
65. Sevidova V., Salnikov Ye., Kalinichenko O. Application of digital technologies in the delivery of cargo in international traffic. *Municipal Economy of Cities*. 2023. Vol. 3 (177). P. 200–205. DOI: <https://doi.org/10.33042/2522-1809-2023-3-177-200-205>.
66. Radivojevic G., Bjelic N., Popovic D. Internet of things in logistics. *3rd Logistics International Conference (Serbia, Belgrade, 2019)*. 2019. № 3. P. 185–190.

67. Чернишова Т. В. Важливість інновацій у логістиці : дис. ... канд. екон. наук. Київ : Національний авіаційний університет, 2022.
68. Ding Y., Jin M., Li S., Feng D. Smart logistics based on the internet of things technology: an overview. *International Journal of Logistics Research and Applications*. 2021. Vol. 24, no. 4. P. 323–345. DOI: <https://doi.org/10.1080/13675567.2020.1757053>.
69. Загурський О. М. Застосування технології інтернету речей в логістиці АПК. *Збірник тез доповідей*. 2021. С. 194.
70. Zhang Y., Wang W., Yan L., Glamuzina B., Zhang X. Development and Evaluation of an Intelligent Traceability System for Waterless Live Fish Transportation. *Food Control*. 2019. Vol. 95. P. 283–297.
71. Новіцький П., Берко А. Еволюція логістичного бізнесу через призму використання інформаційних технологій. *Матеріали конференцій МЦНД (Черкаси, 29 липня 2022 р.)*. 2022. С. 154–159.
72. Чала Н. Особливості використання технологій машинного навчання в логістиці. 2020.
73. Скіцько В. І. Цифрові технології сучасної логістики та управління ланцюгами поставок. *Маркетинг і цифрові технології*. 2018. Т. 2, № 3. С. 48–63.
74. Аверкина М., Загоруйко О. Застосування хмарних технологій у логістичних системах. *Modeling the development of the economic systems*. 2023. № 1. С. 45–49.
75. Смерічевська С. В. Стратегічні тренди розвитку ланцюгів постачання нового покоління в епоху цифровізації економіки. *Бізнес, інновації, менеджмент: проблеми та перспективи*. 2021. С. 282–283.
76. Єсіна О. Г., Марчук І. С. Сучасні інноваційні технології оптимізації логістичних процесів. *Науковий вісник Одеського національного економічного університету*. 2021. № 11-12. С. 132–139. DOI: [10.32680/2409-9260-2021-11-12-288-289-132-139](https://doi.org/10.32680/2409-9260-2021-11-12-288-289-132-139).

77. Ходова Я. Реалізація стратегії розвитку цифрової платформи транспортно-логістичного комплексу. *Молодий вчений*. 2020. № 4 (80). С. 42–45.
78. Познякова О. В., Петренко О. І. Переваги та недоліки використання блокчейн-технології в управлінні ланцюгами поставок. *Bratislava 2019*. 2019. С. 113.
79. Amirgholy M., Shahabi M., Gao H. O. Optimal design of sustainable transit systems in congested urban networks: A macroscopic approach. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*. 2017. Vol. 103. P. 261–285.
80. Pan S., Zhou W., Piramuthu S., Giannikas V., Chen C. Smart city for sustainable urban freight logistics. *International Journal of Production Research*. 2021. Vol. 59, no. 7. P. 2079–2089
81. Хмарна система управління транспортом ANT-Logistics URL: <https://ant-logistics.com/> (дата звернення 07.05.2023).
82. Нові інновації в технології маршрутизації URL: <https://www.omnitrac.com/roadnet-transportation-suite-rt>s (дата звернення 07.05.2023).
83. АВМ Rinkai TMS для автоматичного планування щоденних кільцевих маршрутів URL: <https://tms.abmcloud.com/uk/> (дата звернення 07.05.2023).
84. Logist.UA - TMS Система управління транспортом URL: <https://systemgroup.com.ua/ru/transportnaya-i-pochtovaya-logistika/logistua-tms-sistema-upravleniya-transportom> (дата звернення 07.05.2023).
85. BAS Управління автотранспортом Стандарт URL: <https://www.bas-soft.eu/soft/bas-sectoral/bas-management-of-motor-transport/> (дата звернення 07.05.2023).
86. Система управління транспортом України: незалежний рейтинг TMS від КНУ URL: <https://systemgroup.com.ua/ru/o-kompanii/article/sravnenie-tms-sistem-upravleniya-transportom-ukrainy-nezavisimyy-reyting-tms-ot-krivorozhskogo> (дата звернення 07.05.2023).

87. Syrotynskyi, O. A., Syrotynska, A. P., & Melnyk, L. V. Автоматизація логістичної діяльності транспортних підприємств. *Bulletin National University of Water and Environmental Engineering*. 2021. № 4 (96). С. 295–304. DOI: <https://doi.org/10.31713/ve4202123>.
88. Bednarski L., Roscoe S., Blome C., Schleper M. C. Geopolitical disruptions in global supply chains: a state-of-the-art literature review. *Production Planning and Control*. 2025. Vol. 36, no. 4. P. 536–562. DOI: <https://doi.org/10.1080/09537287.2023.2286283>.
89. Ming L. Y., Omain S. Z. B., Kowang T. O. Supply Chain Resilience: A Review and Research Direction. *International Journal of Academic Research in Business and Social Sciences*. 2021. Vol. 11, no. 12. URL: <https://doi.org/10.6007/ijarbss/v11-i12/11985>.
90. Supply Chain Resilience: A Review from the Inventory Management Perspective / Y. Guo et al. *Fundamental Research*. 2024. URL: <https://doi.org/10.1016/j.fmre.2024.08.002>.
91. Malhouni Y., Mabrouki C. Mitigating risks and overcoming logistics challenges in humanitarian deployment to conflict zones: evidence from the DRC and CAR. *Journal of Humanitarian Logistics and Supply Chain Management*. 2023. URL: <https://doi.org/10.1108/jhlscm-04-2023-0031>.
92. Recent dynamic vehicle routing problems: A survey / B. H. Ojeda Rios et al. *Computers & Industrial Engineering*. 2021. Vol. 160. P. 107604. URL: <https://doi.org/10.1016/j.cie.2021.107604>.
93. Rios B., Xavier E., Miyazawa F., Amorim P., Ferian Curcio E., Santos M. Recent dynamic vehicle routing problems: A survey. *Computers & Industrial Engineering*. 2021. Vol. 160. Art. 107604. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cie.2021.107604>.
94. Li X., Gao C., Wang J., Tang H., Ma T., Yuan F. Research on Multi-Objective Green Vehicle Routing Problem with Time Windows Based on the Improved Non-Dominated Sorting Genetic Algorithm III. *Symmetry*. 2025. Vol. 17, no. 5. Art. 734. DOI: <https://doi.org/10.3390/sym17050734>.

95. Tas, D., Dellaert, N. P., Woensel, van, T., & Kok, de, A. G. (2011). Vehicle routing problem with stochastic travel times including soft time windows and service costs. (BETA publicatie : working papers; Vol. 364). Technische Universiteit Eindhoven.
96. Joshi S., Huynh L. Review on supply chain resilience: phenomena, modelling techniques and framework of resilience building strategies with future research directions. *International Journal of Supply Chain and Operations Resilience*. 2022. Vol. 5. P. 150–184. DOI: 10.1504/IJSCOR.2022.10044576.
97. Ma C., Zhang L., You L., Tian W. A Review of Supply Chain Resilience: A Network Modeling Perspective. *Applied Sciences*. 2025. Vol. 15, no. 1. Art. 265. DOI: <https://doi.org/10.3390/app15010265>.
98. Zeng Z., Wang N., Xu D., Chen R. Cascading Failure Modeling and Resilience Analysis of Coupled Centralized Supply Chain Networks Under Hybrid Loads. *Systems*. 2025. Vol. 13, no. 9. Art. 729. DOI: <https://doi.org/10.3390/systems13090729>.
99. Charkina T., Zadoia V., Yurchyk O. Restoration of the transport infrastructure of Ukraine in the conditions of war: A comparative analysis of economic models and stabilisation mechanisms. *Philosophy, Economics and Law Review*. 2024. P. 50–61. DOI: 10.63341/2786-491X-2024-2-50.
100. Horoshkova L., Bakurova A., Sumets O., Trysnyuk V., Shumeiko V. Mathematical modeling of transport and logistics infrastructure for the post-war reconstruction of Ukraine. *Environmental safety and natural resources*. 2024. Vol. 50. P. 142–156. DOI: 10.32347/2411-4049.2024.2.142-156.
101. Манько С. Яких збитків завдають бізнесу та економіці повітряні тривоги: названо суму – Delo.ua. Останні новини України та світу онлайн – delo.ua. URL: <https://delo.ua/economy/yaki-zbitki-nanosyat-biznesu-ta-ekonomici-povitryani-trivogi-nazvano-sumu-426523/> (дата звернення 09.02.2026).
102. Харківщина стала лідером за кількістю повітряних тривог у 2025 році | Новини Харкова та України - АТН. URL:

<https://atn.ua/kharkiv/kharkivshchyna-stala-liderom-za-kilkistiu-povitrianykh-tryvoh-u-2025-rotsi-496941/> (дата звернення: 09.02.2026).

Додаток А

АКТИ ВПРОВАДЖЕННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ ДОСЛІДЖЕННЯ



## АКТ

про впровадження в навчальний процес матеріалів  
дисертаційної роботи здобувача наукового ступеня доктора філософії за  
спеціальністю 275 – транспортні технології  
(на автомобільному транспорті)

**«ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ОРГАНІЗАЦІЇ ТА  
ЛОГІСТИЧНОГО УПРАВЛІННЯ ПРОЦЕСОМ ДОСТАВКИ  
ВАНТАЖІВ У МІСЬКИХ УМОВАХ»**

Сальнікова Єгор Костянтиновича

Результати дисертаційної роботи Сальнікова Є. К. впроваджено в навчальний процес кафедри транспортних технологій Харківського національного автомобільно-дорожнього університету.

Так, при проведенні навчального процесу зі студентами спеціальності 18 Автомобільний транспорт у межах дисципліни «Вантажні перевезення», розглядаються теоретичні та прикладні аспекти підвищення ефективності автомобільних перевезень за рахунок використання методичного підходу до вибору раціональних транспортно-технологічних схем доставки вантажів, який базується на розробленій у дисертації моделі. Це дозволяє підприємствам здійснювати кількісну оцінку «вартості безпеки» при плануванні маршрутів територією України.

При виконанні кваліфікаційних робіт здобувачами кафедри використовуються розроблені в дисертації методичні підходи до вибору маршрутів доставки вантажів.

Використання матеріалів і результатів дисертаційної роботи Сальнікова Є. К. 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

  
«ЗАТВЕРДЖУЮ»  
Директор ТОВ «ВЕЛЕС-ТА»  
Тетяна МАСЛОВА  
«    »    2026 р.

### АКТ ВПРОВАДЖЕННЯ

**Найменування пропозиції, яка впроваджена:**

Методичний підхід до вибору раціональних транспортно-технологічних схем доставки вантажів, що базується на моделі, розробленій у дисертаційному дослідженні.

**Ким розроблено:**

Харківський національний автомобільно-дорожній університет (ХНАДУ), кафедра транспортних технологій, автор – Сальніков Є.К.

**Де, коли і ким впроваджено:**

Методичний підхід впроваджено у практичну діяльність товариства з обмеженою відповідальністю «ВЕЛЕС-ТА» при плануванні та організації міжнародних автомобільних перевезень вантажів.

**Напрямки, результати, ефективність впровадження:**

Використання розробленого методичного підходу дозволило підприємству отримати наступні результати:

- здійснено перехід до науково обґрунтованого вибору транспортно-технологічних схем доставки на основі кількісних показників;
- забезпечено можливість проведення кількісної оцінки «вартості безпеки» при плануванні міжнародних маршрутів, що проходять територією України;
- підвищено рівень стабільності та безпеки транспортного процесу за рахунок врахування ризиків та факторів впливу середовища;
- оптимізовано витрати на організацію перевезень завдяки вибору найбільш раціональних варіантів доставки у складних умовах експлуатації.


 «ЗАТВЕРДЖУЮ»  
 Директор ТОВ «ОЛЛ ТРАК ПАРТС»  
 Віталій СІВЕРЧУК  
 \_\_\_\_\_ 2026 р.

### АКТ ВПРОВАДЖЕННЯ

**Найменування пропозиції, яка впроваджена:**

Система підтримки прийняття рішень на основі симуляційно-евристичного алгоритму для автоматизації процесів побудови маршрутів доставки вантажів.

**Ким розроблено:**

Харківський національний автомобільно-дорожній університет (ХНАДУ), кафедра транспортних технологій, автор – Сальніков Є.К.

**Де, коли і ким впроваджено:**

Отримані результати впроваджені в роботу логістичного відділу підприємства ТОВ «ОЛЛ ТРАК ПАРТС» з метою оптимізації міської логістики та розподілу товарів.

**Напрямки, результати, ефективність впровадження:**

Застосування симуляційно-евристичного алгоритму в діяльності підприємства забезпечило досягнення таких результатів:

- повна автоматизація процесу побудови оптимальних маршрутів доставки запчастин в умовах щільної міської забудови та динамічного трафіку м. Харкова;
- скорочення часу на підготовку рейсів та формування маршрутних листів логістами відділу;
- підвищення точності планування часу прибуття до клієнтів за рахунок використання симуляційних моделей транспортного процесу.
- зниження експлуатаційних витрат та пробігу транспортних засобів завдяки вибору раціональних траєкторій руху.

**Висновки та зауваження:**

Впроваджена система підтримки прийняття рішень підтвердила свою ефективність у вирішенні задач маршрутизації та рекомендується до постійної експлуатації в логістичних підрозділах компанії.

**Заступник директора  
ТОВ «ОЛЛ ТРАК ПАРТС»**

Олександр ЧЕРЕПАХА

## 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. Калініченко О.П., Черепаха 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>
3. Калініченко О. П., Сальніков Є. К. Математичне моделювання задачі маршрутизації вантажних перевезень в умовах військових ризиків. *Комунальне господарство міст. Серія: «Інформаційні технології та інженерія»*. 2025. Том 6, № 194. С. 420–425. URL: <https://doi.org/10.33042/3083-6727-2025-6-194-420-425>
4. Калініченко О. П., Сальніков Є. К. Оптимізація міської логістики в умовах невизначеності та ризиків. *Комунальне господарство міст. Серія: «Інформаційні технології та інженерія»*. 2026. Том 1, вип. 196. С. 358–364. URL: <https://doi.org/10.33042/3083-6727-2026-1-196-358-364>
5. Kalinichenko O., Sevidova V., Salnikov Y., Kopytkov D. Determining the Expedient Scheme for Delivering Goods by Road Transport in International Traffic. *Transport Systems Development – Methods and Solutions. TSTP 2025* / eds. G. Sierpiński, S. Naumann, E. Macioszek. Cham : Springer, 2026. (Lecture Notes in Networks and Systems ; vol. 1789). URL: [https://doi.org/10.1007/978-3-032-14826-1\\_8](https://doi.org/10.1007/978-3-032-14826-1_8)

Наукові праці, які засвідчують апробацію матеріалів дисертації:

6. Salnikov Ye. K., Kalinichenko O. P. Current state of digitalization of cargo transportation in city conditions. *Студентство. Наука. Іноземна мова : збірник наукових праць студентів, аспірантів та молодих науковців*. Харків : ХНАДУ, 2023. Вип. 15, ч. 2. С. 355–357.
7. Сальніков Є. К., Калініченко О. П. Впровадження концепції Smart City та інформаційних технологій в міську логістику. *Збірник тез доповідей 79-ої Наукової конференції професорсько-викладацького складу, аспірантів, студентів та співробітників відокремлених структурних підрозділів університету*. Київ : НТУ, 2023. Вип. 79.
8. Сальніков Є. К., Калініченко О. П. Концепції логістичного управління вантажними перевезеннями в транспортній системі міста. *Збірник матеріалів 87-ї міжнародної науково-технічної та науково-методичної конференції університету. Секція транспортних технологій (Харків, 10–13 травня 2023 р.)*. Харків : ХНАДУ, 2023. С. 18–20.
9. Сальніков Є. К., Калініченко О. П. Аналіз сучасних міських логістичних систем. *Напрями розвитку технологічної системи логістики в АПВ : збірник матеріалів IV Міжнародної науково-практичної інтернет-конференції (Харків, 20 квітня 2023 р.)*. Харків : ДБТУ, 2023. С. 69–72.
10. Сальніков Є. К., Калініченко О. П. Сучасні підходи до логістичного управління вантажними перевезеннями в міському сполученні. *Збірник матеріалів Міжнародної науково-технічної конференції «Розумний транспорт та інтегровані транспортні технології»*. Харків : ХНАДУ, 2023.
11. Sevidova V. V., Salnikov Ye. K., Kalinichenko O. P. The impact of digitalization on freight transportation. *Topical aspects of modern scientific research : Proceedings of the International Scientific and Practical Conference (March 21-23, 2024)*. Tokyo, Japan : CPN Publishing Group, 2024. P. 114–118.
12. Salnikov Ye. K., Kalinichenko O. P. The importance of digitalization in urban freight transportation. *Інтелектуальні транспортні технології (Харків,*

25–27 листопада 2024 р.) : тези доповідей. Харків : УкрДУЗТ, 2024. С. 177–178.

Додаток В  
ЛІСТИНГ ПРОГРАМИ (ФРАГМЕНТ)

```

import random

def get_numeric_input(prompt: str, value_type=float, min_value=0, default=None) -> float:
    """Запитує числове введення від користувача з перевіркою."""
    while True:
        try:
            user_input = input(prompt)
            if not user_input and default is not None:
                return default
            value = value_type(user_input)
            if value >= min_value:
                return value
        except:
            print(f"Помилка: значення має бути не менше {min_value}.")
    except ValueError:
        print("Помилка: будь ласка, введіть коректне число.")

def print_header(title: str):
    print("\n" + "=" * 70)
    print(f"| {title.center(66)} |")
    print("=" * 70)

#
=====
# 1. КЛАС ПРОСТОПОРОВОГО АНАЛІЗУ: RiskTopologyEngine
#
=====
class RiskTopologyEngine:
    """Клас відповідає за перетворення геопросторових загроз у вартісні штрафи."""
    def __init__(self, E_3, lambda_trevog, E_T_trevogi, P_neproizd, Delta_ij):
        self.E_3 = E_3 # Коефіцієнт критичності загрози
        self.lambda_trevog = lambda_trevog # Інтенсивність тривоги
        self.E_T_trevogi = E_T_trevogi # Тривалість тривоги
        self.P_neproizd = P_neproizd # Ймовірність блокування дуги
        self.Delta_ij = Delta_ij # Витрати на найкоротший об'їзд
        self.bandwidth_h = 300 # Радіус згладжування KDE (за замовчуванням)

    def generate_risk_surface(self):
        """Заглушка: Побудова растрової карти щільності загрози (KDE)."""
        pass

    def integrate_edge_risk(self, route_distance, avg_speed, num_arcs, C_np):
        """Розрахунок інтегрованого воєнного ризику R_ij для маршруту."""
        total_route_time = route_distance / avg_speed

        # 1. Простій через тривоги (системний темпоральний ризик)
        base_downtime_cost = self.lambda_trevog * total_route_time * self.E_T_trevogi * C_np

        # 2. Об'їзди через руйнування (локальний топологічний ризик)

```

```

base_detour_cost = num_arcs * self.P_neproizd * self.Delta_ij

base_military_risk = base_downtime_cost + base_detour_cost
# Скаляризація через коефіцієнт критичності загрози
adjusted_military_risk = base_military_risk * self.E_3

return base_military_risk, adjusted_military_risk

def get_safety_skeleton(self):
    """Заглушка: Фільтрація дуг для формування «безпечового каркаса». """
    pass

#
=====
# 2. КЛАС ВЕРИФІКАЦІЇ: EventSimulator (Монте-Карло)
#
=====
class EventSimulator:
    """Імплементує модуль Монте-Карло для стохастичної оцінки сценаріїв. """
    def __init__(self, iterations=1000):
        self.N = iterations

    def spawn_scenario(self, P_neproizd, lambda_trevog, route_time):
        """Генерує випадкову реалізацію операційного середовища. """
        # Симуляція блокування
        is_blocked = random.random() < P_neproizd
        # Симуляція повітряної тривоги (спрощений Пуассон)
        expected_raids = lambda_trevog * route_time
        has_raid = random.random() < min(expected_raids, 1.0)
        return is_blocked, has_raid

    def execute_simulation(self, P_neproizd, lambda_trevog, route_time):
        """Проводить N ітерацій для розрахунку індексу надійності P_s. """
        success_count = 0
        for _ in range(self.N):
            is_blocked, has_raid = self.spawn_scenario(P_neproizd, lambda_trevog, route_time)
            # Успішний рейс - без об'їздів і тривог
            if not is_blocked and not has_raid:
                success_count += 1

        ps_index = success_count / self.N
        return ps_index

#
=====
# 3. КЛАС ОПТИМІЗАЦІЇ: ALNSOptimizer
#
=====
class ALNSOptimizer:
    """Реалізує логіку алгоритму адаптивного пошуку (ALNS). """

```

```

def __init__(self, risk_engine, simulator, C_op, C_np, avg_speed, dist_matrix):
    self.risk_engine = risk_engine
    self.simulator = simulator
    self.C_op = C_op
    self.C_np = C_np
    self.avg_speed = avg_speed
    self.dist_matrix = dist_matrix

#
def risk_weighted_removal(self): pass
def shaw_removal(self): pass
def safety_insertion(self): pass
def regret_k_insertion(self): pass
def update_scores(self): pass
def recalculate_weights(self): pass

def evaluate_routes(self, routes):
    """
    Оцінює поточну популяцію маршрутів.
    У повній версії цей метод викликається всередині циклу ALNS.
    """
    results = []
    total_op = 0
    total_base_risk = 0
    total_adj_risk = 0

    for route_info in routes:
        route_plan = route_info['route_plan']
        num_arcs = len(route_plan) - 1

        # Розрахунок відстані
        route_distance = sum(self.dist_matrix[route_plan[i]][route_plan[i + 1]] for i in
range(num_arcs))
        route_time = route_distance / self.avg_speed
        op_cost = self.C_op * route_distance

        # Звернення до RiskTopologyEngine для розрахунку ризиків
        base_risk, adj_risk = self.risk_engine.integrate_edge_risk(
            route_distance, self.avg_speed, num_arcs, self.C_np
        )

        # Звернення до EventSimulator для розрахунку робастності (N=1000)
        ps_index = self.simulator.execute_simulation(
            self.risk_engine.P_neproizd,
            self.risk_engine.lambda_trevog,
            route_time
        )

        total_op += op_cost
        total_base_risk += base_risk
        total_adj_risk += adj_risk

```

```

route_info['metrics'] = {
    'operational': op_cost,
    'base_military_risk': base_risk,
    'adjusted_military_risk': adj_risk,
    'total_classic': op_cost + base_risk,
    'total_adjusted': op_cost + adj_risk,
    'ps_index': ps_index,
    'distance': route_distance
}
results.append(route_info)

return {
    'route_details': results,
    'total_op': total_op,
    'total_base_risk': total_base_risk,
    'total_adjusted_cost': total_op + total_adj_risk
}

#
=====
# ІНТЕРФЕЙС ТА УПРАВЛІННЯ ДАНИМИ
#
=====

def get_user_inputs():
    """Збирає вхідні дані."""
    params = {}

    print_header("1. АВТОМОБІЛІ ТА ЕКСПЛУАТАЦІЙНІ ВИТРАТИ")
    params['C_op'] = get_numeric_input("Введіть операційні витрати на 1 км (грн/км): ")
    params['C_np'] = get_numeric_input("Введіть витрати на 1 годину простою екіпажу та ТЗ (грн/год): ")
    params['avg_speed'] = get_numeric_input("Введіть середню швидкість руху (км/год): ", min_value=1)

    num_vehicles = get_numeric_input("Введіть кількість ТЗ: ", value_type=int, min_value=1)
    params['vehicles'] = [{'id': k + 1} for k in range(num_vehicles)]

    print_header("2. ПУНКТИ ТА ВІДСТАНІ")
    num_clients = get_numeric_input("Введіть кількість клієнтів (точок доставки): ", value_type=int, min_value=1)

    locations = ["Депю"] + [f"Клієнт_{i + 1}" for i in range(num_clients)]
    dist_matrix = [[0.0] * (num_clients + 1) for _ in range(num_clients + 1)]
    print("\n--- Введіть матрицю відстаней, км ---")
    for i in range(len(locations)):
        for j in range(i + 1, len(locations)):
            dist = get_numeric_input(f"Відстань між '{locations[i]}' та '{locations[j]}': ")
            dist_matrix[i][j] = dist_matrix[j][i] = dist
    params['dist_matrix'] = dist_matrix

    print_header("3. АНАЛІЗ ВОЄННИХ РИЗИКІВ")

```

```

params['E_3'] = get_numeric_input("Введіть Коефіцієнт критичності загрози (E_3) [1.0 -
нейтралітет, >1 - каркас]: ", min_value=1.0, default=1.0)
params['lambda_trevog'] = get_numeric_input("Введіть інтенсивність повітряних тривог
(тривог/год) [напр. 0.15]: ")
params['E_T_trevogi'] = get_numeric_input("Введіть очікувану тривалість однієї тривоги
(год) [напр. 1.5]: ")
params['P_neproizd'] = get_numeric_input("Введіть ймовірність блокування дуги (0.0 - 1.0)
[напр. 0.05]: ", min_value=0, max_value=1)
params['Delta_ij'] = get_numeric_input("Введіть витрати на найкоротший об'їзд
заблокованої ділянки (грн): ")

```

```

print_header("4. ВВЕДЕННЯ МАРШРУТІВ ДЛЯ ОЦІНКИ")
routes = []
for vehicle in params['vehicles']:
    while True:
        try:
            route_str = input(f"Введіть маршрут для ТЗ №{vehicle['id']} через кому (напр.,
1,3,2). Залиште пустим для пропуску: ")
            if not route_str:
                break
            client_nodes = [int(c.strip()) for c in route_str.split(',')]
            route_plan = [0] + client_nodes + [0]

            routes.append({
                'vehicle_id': vehicle['id'],
                'route_plan': route_plan
            })
            break
        except ValueError:
            print("Помилка формату. Спробуйте ще раз.")
params['routes'] = routes

return params

```

```

def display_results(results, E_3):
    print_header("РЕЗУЛЬТАТИ ОПТИМІЗАЦІЇ ТА СИМУЛЯЦІЇ")

    total_classic = results['total_op'] + results['total_base_risk']
    total_adjusted = results['total_adjusted_cost']

    print(f"☑ КЛАСИЧНІ ОЧІКУВАНІ ВИТРАТИ (без посилення безпеки):
{total_classic:,.2f} грн")
    print(f"🔥 ЗАГАЛЬНА ЦІЛЬОВА ФУНКЦІЯ Z (з Коефіцієнтом E_3 = {E_3}):
{total_adjusted:,.2f} грн\n")

    print("--- Деталізація по маршрутах ---")
    for route in results['route_details']:
        metrics = route['metrics']
        route_str = " -> ".join(map(str, route['route_plan']))
        print(f"\n 🚚 ТЗ №{route['vehicle_id']} ({route_str}):")
        print(f"   - Відстань: {metrics['distance']:,.2f} км")

```

```

    print(f" - Операційні витрати: {metrics['operational']:,2f} грн")
    print(f" - Воєнні ризики: {metrics['base_military_risk']:,2f} грн (база) ->
{metrics['adjusted_military_risk']:,2f} грн (з урахуванням E_3)")
    print(f" - Цільова функція маршруту: {metrics['total_adjusted']:,2f} грн")
    print(f" - Індекс надійності (P_s) після Монте-Карло: {metrics['ps_index']:.2%}")

def main():
    print("*" * 75)
    print("СППР: СИМУЛЯЦІЙНО-ЕВРИСТИЧНИЙ АЛГОРИТМ В УМОВАХ ВОЄННИХ
РИЗИКІВ")
    print("*" * 75)

    params = get_user_inputs()

    # Ініціалізація ООП класів відповідно до архітектури дисертації
    risk_engine = RiskTopologyEngine(
        E_3=params['E_3'],
        lambda_trevog=params['lambda_trevog'],
        E_T_trevogi=params['E_T_trevogi'],
        P_neproizd=params['P_neproizd'],
        Delta_ij=params['Delta_ij']
    )

    simulator = EventSimulator(iterations=1000)

    optimizer = ALNSOptimizer(
        risk_engine=risk_engine,
        simulator=simulator,
        C_op=params['C_op'],
        C_np=params['C_np'],
        avg_speed=params['avg_speed'],
        dist_matrix=params['dist_matrix']
    )

    # Запуск оцінки (у повній програмі тут викликається ALNS-цикл)
    final_results = optimizer.evaluate_routes(params['routes'])

    display_results(final_results, params['E_3'])

if __name__ == "__main__":
    main()

```