

ХЕРСОНСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

(повне найменування вищого навчального закладу)

ФАКУЛЬТЕТ ІНЖЕНЕРІЇ ТА ТРАНСПОРТУ

(повне найменування інституту, назва факультету (відділення))

КАФЕДРА ТРАНСПОРТНИХ СИСТЕМ І ТЕХНІЧНОГО СЕРВІСУ

(повна назва кафедри (предметної, циклової комісії))

Пояснювальна записка

до кваліфікаційної роботи бакалавра

на тему: Оптимізація маршрутів доставки вантажів в умовах військових дій

Виконав: студент 4_курсу, групи 4_ТТ
Спеціальності 275 – Транспортні технології
Спеціалізації 275.03 – На автомобільному
транспорті

_____ Володимир ПОТОРЖИНСЬКИЙ

Керівник _____ Павло ЛУБ'ЯНИЙ

Рецензент _____ Ольга ВОЙТОВИЧ

Херсон - 2026 рік

ЗАТВЕРДЖЕНО
Наказ Міністерства освіти і науки,
молоді та спорту України
29 березня 2012 року № 384

ХЕРСОНСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ.
(повне найменування вищого навчального закладу)

Інститут, факультет, відділення Інженерії та транспорту
Кафедра, циклова комісія Транспортних систем і технічного сервісу
Рівня вищої освіти бакалавр
Спеціальність 275 Транспортні технології
Спеціалізація 275.03 На автомобільному транспорті
(шифр і назва)

ЗАТВЕРДЖУЮ
Завідувач кафедри ТСТС
к.т.н., доц.  П.В.Луб'яний

“ ____ ” _____ 2026 року

З А В Д А Н Н Я
НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ БАКАЛАВРА

СТУДЕНТУ

Поторжинському Володимирі Олеговичу

1. Тема проекту (роботи) Оптимізація маршрутів доставки вантажів в умовах військових дій

керівник проекту (роботи). к.т.н., доцент Луб'яний П.В

затверджені наказом вищого навчального закладу від 26.18.2026 року № 122-с

2. Строк подання студентом проекту (роботи) 08.06.2026 р.

3. Вихідні дані до проекту (роботи) Ефективність логістичних операцій підприємств, що функціонують в умовах воєнного стану

4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити) Вступ, 1 Теоретико-методичні основи оцінювання економічної ефективності логістичних операцій 2 Економіко-математичне моделювання ефективності логістичних операцій в умовах воєнного стану 3 Практична реалізація та оцінка економічної ефективності. Висновки, Список використаних джерел.

5. Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень)
матеріали демонстраційної графічної частини формату А4

Консультанти розділів проекту (роботи)

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв

7. Дата видачі завдання _____.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів дипломного проекту (роботи)	Строк виконання етапів проекту (роботи)	Примітка
1	Вступ	26.05.2026	
2	Теоретико-методичні основи оцінювання економічної ефективності логістичних операцій	29.05.2026	
3	Економіко-математичне моделювання ефективності логістичних операцій в умовах воєнного стану	02.06. 2026	
4	Практична реалізація та оцінка економічної ефективності	07.06. 2026	
5	Висновки	13.06. 2026	

Студент _____ **Володимир ПОТОРЖИНСЬКИЙ**

Керівник проекту (роботи) _____ **Павло ЛУБ'ЯНИЙ**
(підпис)

РЕФЕРАТ

Робота містить 75 сторінок, 27 таблиць, 21 рисунок. Перелік посилань нараховує 9 найменувань.

Метою роботи є розроблення та апробація економіко-математичної моделі оцінки та прогнозування економічної ефективності логістичних операцій підприємств, що функціонують в умовах воєнного стану, з урахуванням ризиків, ресурсних обмежень і динаміки зовнішнього середовища, а також формування рекомендацій щодо її практичного застосування.

Об'єктом роботи є логістичні операції підприємств.

Методи дослідження. У процесі виконання дипломної роботи застосовувалася сукупність загальних та специфічних методів аналізу. Для дослідження сучасних підходів до управління логістикою використовувалися методи логічних узагальнень, абстрактно-логічний підхід, причинно-наслідковий аналіз. Для отримання аналітичної інформації були використані дані статистичної звітності, внутрішньої (зокрема бухгалтерської) звітності підприємства. Для побудови моделі аналізу ефективності логістичних операцій застосовано методи лінійного програмування, транспортну задачу, аналіз часових рядів, графічне моделювання та імітаційне моделювання. Теоретичною основою дослідження стали наукові праці вітчизняних та зарубіжних авторів, що присвячені проблемам управління логістикою, моделювання та оптимізації бізнес-процесів.

Ключові слова: моделювання, логістика, логістичні витрати, транспортна задача, воєнний стан, ризики перевезень, оптимізація маршрутів, економічна ефективність.

ВСТУП

1 ТЕОРЕТИКО-МЕТОДИЧНІ ОСНОВИ ОЦІНЮВАННЯ ЕКОНОМІЧНОЇ ЕФЕКТИВНОСТІ ЛОГІСТИЧНИХ ОПЕРАЦІЙ	
1.1 Економічна сутність та особливості логістичних операцій в умовах воєнного стану	10
1.2 Методи оцінки економічної ефективності логістичних операцій	15
1.3 Оптимізація логістичних процесів в умовах нестабільності	23
Висновки до першого розділу	31
2 ЕКОНОМІКО-МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ЛОГІСТИЧНИХ ОПЕРАЦІЙ В УМОВАХ ВОЄННОГО СТАНУ	34
2.1 Фінансово-економічна характеристика підприємств	34
2.2 Оцінка логістичної діяльності підприємств	42
2.3 Побудова економіко-математичної моделі ефективності логістичних операцій	61
Висновки до другого розділу	74
3 ПРАКТИЧНА РЕАЛІЗАЦІЯ ТА ОЦІНКА ЕКОНОМІЧНОЇ ЕФЕКТИВНОСТІ МОДЕЛЮВАННЯ ЛОГІСТИЧНИХ ОПЕРАЦІЙ	76
3.1 Аналіз результатів моделювання економічної ефективності логістичних операцій	76
3.2 Практичне застосування моделі для покращення економічних показників та оптимізації логістичних рішень	83
Висновки до третього розділу	88
ВИСНОВКИ	90
ПЕРЕЛІК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	92
ДОДАТКИ	97

ВСТУП

Ескалація воєнних дій на території України зумовила глибокі структурні трансформації в усіх секторах національної економіки, серед яких транспортно-логістична система зазнала найбільших деструктивних впливів. У сучасних реаліях логістична діяльність втрачає характер суто допоміжного технічного інструменту забезпечення просторового переміщення та перерозподілу матеріальних ресурсів. Вона набуває стратегічного значення, виступаючи критичним чинником забезпечення інваріантності й безперервності бізнес-процесів, підвищення адаптаційного потенціалу суб'єктів господарювання та їхньої резистентності щодо екзогенних безпекових загроз.

Масове руйнування об'єктів транспортної інфраструктури, блокування традиційних інтермодальних маршрутів, гострий дефіцит рухомого складу та енергоресурсів змушують підприємства проводити радикальний реінжиніринг наявних логістичних стратегій. Актуалізується вектор на впровадження динамічних моделей управління матеріалопотоками, адаптованих до умов високої стохастичності, критичного рівня ризиків та ресурсних обмежень. За таких обставин особливого науково-практичного значення набуває економіко-математичне моделювання ефективності логістичних операцій. Воно забезпечує прийняття верифікованих управлінських рішень, оптимізацію параметрів вантажопотоків, мінімізацію сукупних логістичних витрат (Total Logistics Costs) та загальне підвищення гнучкості транспортних систем.

1. ТЕОРЕТИКО-МЕТОДИЧНІ ОСНОВИ ОЦІНЮВАННЯ ЕКОНОМІЧНОЇ ЕФЕКТИВНОСТІ ЛОГІСТИЧНИХ ОПЕРАЦІЙ

1.1. Економічна сутність та особливості логістичних операцій в умовах воєнного стану

У межах функціонування сучасних макро- та мікроекономічних систем логістика виступає базовим інтеграційним чинником. Вона забезпечує оптимізацію та наскрізне управління матеріальними, інформаційними, фінансовими та сервісними потоками, консолідуючи розрізнені ланки ланцюгів постачань у синергетичні структури. Особливого значення логістичний менеджмент набуває за умов макроекономічної дестабілізації та дії правового режиму воєнного стану, коли функціонування суб'єктів ринку відбувається під впливом критичної невизначеності й системних розривів у ланцюгах розподілу.

Базовою дескриптивною категорією логістичного управління є «логістичні операції». Аналіз фундаментальної наукової літератури дозволяє констатувати наявність мультиаспектного підходу до дефініції цього поняття. Зокрема, Зубров С. М. та Молчанов О. В. розглядають логістичні операції як елементарні технологічні дії, що забезпечують безпосередню реалізацію логістичних функцій у межах ланцюга постачання з метою мінімізації загальних витрат при заданому рівні надійності системи.

Желіховська М. акцентує увагу на діджиталізації процесів, визначаючи логістичні операції як архітектурний компонент цифрових логістичних систем, що функціонують у високодинамічному екзогенному середовищі за умов жорстких обмежень щодо часових параметрів (Lead Time). Своєю чергою, Гірна О. Б. та Петляківський О. А. позиціонують логістичні операції як адаптивну підсистему ланцюга постачання, архітектура якої володіє високою лабільністю щодо трансформацій транспортної інфраструктури, інституційного регулювання

та флуктуацій попиту. Компаративний аналіз теоретичних підходів наведено в таблиці 1.1.

Таблиця 1.1 – Компаративний аналіз наукових підходів до дефініції поняття «логістичні операції»

Автор(и)	Сутнісний зміст дефініції	Науковий фокус підходу
Зубров С. М., Молчанов О. В.	Комплекс елементарних дій, спрямованих на реалізацію логістичних функцій у ланцюгу постачання	Функціонально-вартісна оптимізація
Желіховська М.	Стратегічний та операційний компонент цифрової логістичної системи підприємства	Цифровізація та інформаційна інтеграція
Гірна О. Б., Петляківський О. А.	Динамічна структура елементів, що адаптується до деструктивних впливів зовнішнього середовища	Системна адаптивність та стійкість

Узагальнення наявних теоретичних концепцій дозволяє стверджувати, що логістичні операції — це системно організовані, технологічно неподільні дії, пов’язані з просторово-часовою трансформацією матеріальних потоків (переміщення, складування, вантажопереробка, пакування), а також супровідним генеруванням та обробкою інформаційних і фінансових потоків. Класифікацію логістичних операцій за ключовими класифікаційними ознаками систематизовано в таблиці 1.2.

Таблиця 1.2 – Систематизація логістичних операцій за класифікаційними ознаками

Ознака класифікації	Класифікаційні групи логістичних операцій
За видом матеріального потоку	Сировинні, виробничі, збутові (дистрибуційні)
За рівнем декомпозиції управління	Операційні, тактичні, стратегічні
За об'єктом логістичного впливу	Матеріальні, інформаційні, фінансові, сервісні
За стадією інтегрованого процесу	Закупівельні, транспортні, складські, збутові
За ступенем технологізації	Мануальні (ручні), механізовані, автоматизовані, цифровізовані

Зазначені операції реалізуються як у внутрішньому контурі підприємства, так і в процесі міжорганізаційної інваріантної взаємодії суб'єктів ринку. До базових операцій відносять: магістральне та розвізне транспортування, навантажувально-розвантажувальні й термінальні роботи, страхування та управління запасами, сортування, тарування, а також митне адміністрування (експедирування).

Синтезуючи наведені дефініції, логістичні операції в межах транспортної галузі слід визначити як комплекс детермінованих технологічних процедур, спрямованих на просторово-часове переміщення вантажопотоків та супровідних інформаційно-сервісних потоків у логістичній мережі з метою максимізації рівня сервісу споживачів (Customer Service Level) за критеріями мінімізації часових параметрів, сукупних витрат та збереження вантажу.

Ефективна організація логістичних операцій виступає фундаментальним драйвером формування доданої вартості (Value Added) транспортних послуг. Оптимізація параметрів вантажопотоків дозволяє мінімізувати логістичні витрати, ліквідувати непродуктивні втрати часу та прискорити оборотність оборотного капіталу. В умовах монополістичної чи олігополістичної конкуренції саме якість реалізації логістичних операцій (забезпечення концепції Just-in-Time, гнучкість маршрутизації) визначає стратегічні конкурентні переваги підприємства.

Специфіка реалізації логістичних операцій в умовах воєнного стану зумовлена дією низки деструктивних факторів: руйнуванням лінійної та точкової транспортної інфраструктури, блокуванням стратегічних транспортних коридорів, виникненням локальних ресурсних дефіцитів, а також критичним зростанням безпекових ризиків. За таких умов управління ризиками (Risk Management) в ланцюгах постачань трансформується з допоміжної функції у стратегічний імператив забезпечення життєздатності бізнесу.

Систематизація основних логістичних ризиків в умовах воєнного стану (інфраструктурні обмеження, ускладнення транскордонних та внутрішніх переміщень вантажів, асиметрія інформаційного забезпечення, форс-мажорні безпекові фактори) є основою для розроблення адаптивної логістичної стратегії.

Варто підкреслити, що кризовий стан логістичної системи під час війни характеризується не лише фізичними втратами активів. Суттєвими дестабілізуючими чинниками є неможливість довгострокового прогнозування параметрів попиту, дефіцит кваліфікованого лінійного та управлінського персоналу (зокрема, водіїв категорій C, CE), волатильність ринку нафтопродуктів та дефіцит складських площ класу «А» у безпечних регіонах. Це призводить до десинхронізації логістичних процесів і вимагає превентивного впровадження інноваційних рішень: від супутникового моніторингу транспортних засобів у

реальному часі до розроблення стохастичних моделей динамічного перепроєктування мережі (Supply Chain Design).

Калюжна Н. Г. та Шеремет А. С. наголошують на пріоритетності впровадження Cloud-платформ, інтегрованих з TMS (Transportation Management System) та WMS (Warehouse Management System), для забезпечення наскрізної видимості вантажу (End-to-End Visibility), автоматизації митного оперування та оперативного динамічного перерахунку маршрутів доставки (Dynamic Routing). Отже, сучасні логістичні операції трансформуються у високотехнологічну антикризову систему з цифровим керуванням.

Основними трансформаційними векторами логістичних операцій в умовах війни є:

1. Зміна просторової архіметрії та географії вантажопотоків (регіональний перерозподіл, диверсифікація каналів постачання, релокація виробничо-складських потужностей).
2. Перехід до мультимодальних та багатоканальних схем доставки (Multichannel Routing) задля мінімізації мономаршрутних ризиків.
3. Ескалація ролі інформаційної логістики як базису для прийняття миттєвих операційних рішень в умовах високої турбулентності.

Окрім фізичних та ринкових обмежень, логістичні системи зазнають тиску значних інституційних бар'єрів (специфіка державного регулювання, особливості перетину державного кордону, квотування, ліцензування, дефіцит сертифікованого рухомого складу). Державна логістична політика в цих умовах має бути максимально лабільною, забезпечуючи підтримання працездатності критичних ланцюгів постачань.

Окремого розгляду потребує нормативно-правове регулювання транспортно-логістичної діяльності в умовах воєнного стану. Правове поле формується нормами Закону України «Про правовий режим воєнного стану» від 12.05.2015 № 389-VIII, який передбачає можливість військово-транспортного

обов'язку (тимчасової реквізиції рухомого складу), комендантських обмежень на пересування, особливих режимів роботи об'єктів критичної інфраструктури тощо. Для автотранспортних підприємств (АТП) це трансформується у ризики вилучення частини активів, зміну графіків роботи терміналів та необхідність постійного коригування маршрутних карт і планів завантаження.

Значний вплив на фінансово-економічні результати транспортної діяльності мають зміни у фіскальній політиці. Тимчасове скасування акцизу на нафтопродукти та зниження ставки ПДВ у 2022 році виступили дієвим інструментом демпфування цінового шоку на ринку пального. Проте відновлення довоєнних ставок оподаткування у липні 2023 року призвело до зростання вартості пального на 5–7 грн/л, що суттєво збільшило питому вагу паливної складової у структурі собівартості 1 т-км перевезень.

Динамічність нормативно-правового середовища формує жорсткі екзогенні обмеження, які мають обов'язково імплементуватися в оптимізаційні економіко-математичні моделі логістичних систем. Безперервний моніторинг регуляторних змін є обов'язковою умовою забезпечення економічної стійкості автотранспортних та логістичних підприємств.

1.2. Методи оцінки економічної ефективності логістичних операцій

Об'єктивна оцінка ефективності функціонування логістичної системи є базовою умовою збереження конкурентоспроможності транспортних компаній в умовах макроекономічної турбулентності. У кризові періоди параметри ефективності логістичного менеджменту безпосередньо корелюють із показниками фінансової спроможності та ринкової життєздатності підприємств. Це зумовлює необхідність застосування комплексного методичного інструментарію оцінювання, який інтегрує не лише вартісні (фінансові), а й часові, ресурсні та ризикові параметри процесів.

У сучасній економічній науці класифікацію методів оцінювання ефективності логістичних операцій здійснюють за чотирма основними класифікаційними групами:

1. **Аналітичні методи.** Базуються на детермінованому розрахунку ключових показників ефективності (Key Performance Indicators — KPI) логістики: питомих витрат на транспортування (Зтр), складування (Зскл), управління запасами (Ззап), а також тривалості логістичних циклів. Вони дозволяють визначити рентабельність логістичних послуг та частку логістичних витрат у загальній собівартості продукції.

2. **Моделювальні (економіко-математичні) методи.** Передбачають розроблення математичних, стохастичних або імітаційних моделей для прогнозування параметрів системи за різних операційних сценаріїв. Включають методи лінійного та динамічного програмування (зокрема, класичні та ускладнені транспортні задачі, моделі оптимальної дислокації складських хабів та оптимізації маршрутів доставки вантажів).

3. **Статистичні методи.** Спрямовані на опрацювання ретроспективних масивів даних з метою виявлення трендів, кореляційних залежностей та аномалій у логістичних процесах. Застосування регресійного аналізу та аналізу часових рядів дає змогу оцінити взаємозв'язок між обсягами оборотних коштів у запасах, швидкістю виконання замовлень (Order Cycle Time) та ймовірністю виникнення дефіциту (Stockout).

4. **Інтегральні методи.** Передбачають зведення мультикритеріальних параметрів системи до єдиного узагальненого показника. Включають метод аналізу ієрархій (АНР), бенчмаркінг, зважений експертний аналіз та інтегровану систему збалансованих показників (Balanced Scorecard — BSC). Дозволяють одночасно враховувати як кількісні (економічні), так і якісні критерії (гнучкість, адаптивність, рівень логістичного сервісу).

Найбільш релевантним та оперативно впроваджуваним у практиці фінансово-економічного аналізу транспортних підприємств є аналітичний метод, побудований на оцінці системи показників ефективності.

Одним із центральних показників є коефіцієнт обіговості запасів (K_o), який розраховується за формулою:

$$K_o = \frac{\text{Собівартість реалізованої продукції}}{\text{Середній залишок запасів}} \quad (1.1)$$

де K_o – коефіцієнт обіговості запасів;

Даний індикатор характеризує інтенсивність оновлення матеріальних ресурсів за визначений часовий інтервал. Високі значення K_o свідчать про раціональність політики управління запасами, прискорення капіталообороту та зниження капіталомісткості зберігання. Низькі рівні показника вказують на затовареність складських площ, заморожування оборотних коштів та зростання ризиків морального і фізичного знецінення вантажів. В умовах воєнного стану та пов'язаної з ним нестабільності ланцюгів постачань оптимізація обіговості є критичним чинником забезпечення ліквідності підприємства.

Для оцінки безпосередньої фінансової віддачі логістичної діяльності використовують показник рентабельності логістичних операцій ($R_{\text{л}}$, %):

$$R_{\text{л}} = \frac{\Pi_{\text{л}}}{З_{\text{л}}} \times 100\% \quad (1.2)$$

де:

$R_{\text{л}}$ — логістичний прибуток (різниця між валовим доходом від надання логістичних/транспортних послуг та сукупними логістичними витратами);

$З_{\text{л}}$ — сукупні логістичні витрати.

Даний показник відображає обсяг генерованого прибутку на одну гривню вкладених у логістичну систему ресурсів. Для суб'єктів ринку, у яких логістика є профільним видом бізнесу (3PL/4PL-оператори, транспортно-експедиторські компанії), максимізація логістичного прибутку та рентабельності виступає цільовою функцією стратегічного розвитку.

Ключову систему аналітичних показників, що застосовуються у вітчизняній та міжнародній практиці для оцінювання транспортно-логістичної діяльності, систематизовано в таблиці 1.3.

Таблиця 1.3 – Система ключових показників оцінювання ефективності логістичних операцій

Показник	Формула / визначення	Економічна інтерпретація
Коефіцієнт обіговості запасів	$K_o = \text{Собівартість реалізованої продукції} / \text{Середній залишок запасів}$	Визначає, скільки разів за період підприємство оновлює товарні запаси
Частка витрат на логістику	$Ч_l = \text{Логістичні витрати} / \text{Загальні операційні витрати} \times 100\%$	Визначає частку логістичних витрат у загальних витратах підприємства
Логістичний прибуток	$\Pi_l = \text{Виторг від логістичної діяльності} - \text{Логістичні витрати}$	Показує дохід від логістики після покриття відповідних витрат
Рентабельність логістики	$R_l = \Pi_l / Z_l \times 100\%$	Відображає прибуток з кожної гривні витрат на логістику
Ефективність логістичних витрат	$E_l = (B - Z_l) / Z_l \times 100\%$	Інтегральна оцінка віддачі від витрат на логістику
Середній час логістичного циклу	$T_c = (\sum t_i) / n$	Визначає середню тривалість логістичного замовлення
Витрати на одиницю доставки	$C_{од} = Z_l / N$	Оцінює ефективність витрат у розрахунку на одиницю доставки

Для оцінки загального рівня фінансової віддачі логістичних витрат у межах інтегрованої системи підприємства застосовують показник ефективності логістичних витрат (E_l , %):

$$E_{\text{л}} = \frac{B - 3_{\text{л}}}{3_{\text{л}}} \times 100\% \quad (1.3)$$

де B — загальна виручка від реалізації продукції/послуг суб'єкта господарювання. Це інтегральний маркер, що дозволяє оцінити масштаб впливу логістичної складової на формування загального доходу підприємства в умовах багатofакторного кризового середовища.

Поряд із детермінованими аналітичними розрахунками, високу ефективність демонструють економіко-математичні моделі. Зокрема, застосування класичної транспортної задачі лінійного програмування за критерієм мінімізації сумарного вантажообігу ($T_{\text{to min}}$) дозволяє суттєво оптимізувати витрати. В умовах воєнного стану дані моделі модифікуються шляхом введення стохастичних обмежень: імовірності руйнування ділянок доріг, динамічної зміни вартості палива та необхідності створення резервних (дублюючих) логістичних вузлів.

Ефективним інструментом є імітаційне моделювання (Discrete Event Simulation), яке передбачає розроблення цифрового двійника (Digital Twin) транспортно-логістичної системи у середовищах AnyLogic, Arena або FlexSim. Це дозволяє здійснювати стрес-тестування логістичного ланцюга за умов імітації критичних збоїв у постачанні, затримок на прикордонних переходах або блокування магістралей.

Для моніторингу часових параметрів функціонування транспортної системи та швидкості обслуговування клієнтів використовують середню тривалість логістичного циклу ($T_{\text{с}}$):

$$T_{\text{с}} = \frac{\sum_{i=1}^n t_i}{n} \times 100\% \quad (1.4)$$

де t_i — тривалість виконання i -го логістичного замовлення,

n — загальна кількість виконаних замовлень за період.

Скорочення величини T_c є свідченням високої оперативності та пропускнуої спроможності транспортної мережі.

З метою оперативного контролю використання транспортних ресурсів розраховують показник витрат на одиницю доставки ($C_{од}$):

$$C_{од} = \frac{Z_d}{N} \quad (1.5)$$

де N — загальна кількість здійснених доставок вантажів за аналізований період.

Зростання значення $C_{од}$ є негативним індикатором, що сигналізує про падіння коефіцієнта використання вантажопідйомності/місткості рухомого складу, неефективне холосте пробігування або нерациональний вибір маршрутів.

У сучасних умовах функціонування транспортного сектору методологія оцінювання ефективності зазнає суттєвої трансформації під впливом впровадження технологій Big Data, IoT (інтернету речей) та AI (штучного інтелекту). Системи GPS/ГЛОНАСС моніторингу, автоматизовані системи управління транспортом (TMS) та інтегровані ERP-платформи дозволяють автоматизувати процес збору первинних даних, скорочуючи тривалість розрахунку логістичних KPI майже на 70%. Застосування інтелектуальних алгоритмів забезпечує можливість побудови адаптивних маршрутів у режимі реального часу (Real-time Routing Simulation), що нівелює простой та знижує сукупні втрати.

В аспекті інтегральних методів заслуговує на увагу метод оболонки даних — Data Envelopment Analysis (DEA), який дозволяє проводити порівняльну оцінку відносної ефективності функціонування окремих транспортних підрозділів або філій логістичного оператора за умов мультикритеріальних

вихідних (кількість рухомого складу, чисельність водіїв, витрати пального) та вихідних (обсяг перевезень, дохід) параметрів.

Для умов воєнного стану найбільш раціональним є комбінований методичний підхід: первинний експрес-моніторинг аналітичних KPI (тривалість циклу, рівень витрат), подальша оптимізація потоків засобами лінійного програмування та фінальна верифікація рішень за допомогою імітаційного моделювання сценаріїв. Інтегрована оцінка створює надійне підґрунтя для стратегічного моделювання розвитку транспортно-логістичного комплексу підприємства з урахуванням політико-економічних та безпекових ризиків екзогенного середовища.

Компаративний аналіз базових методів економіко-математичного моделювання логістичних процесів наведено в таблиці 1.4.

Таблиця 1.4 – Компаративний аналіз методів економіко-математичного моделювання логістичних систем

Метод моделювання	Цільове функціональне призначення	Переваги методу	Обмеження щодо застосування
Економетричне моделювання	Встановлення кількісних взаємозв'язків між витратами та результуючими факторами	Висока точність оцінки факторного впливу	Потреба у тривалих репрезентативних масивах ретроспективних даних
Статистичний аналіз	Ідентифікація трендів, циклічності та аномалій у логістичних процесах	Методична простота, якісний опис динаміки системи	Низька прогностична здатність у точках структурних зламів ринку

Метод моделювання	Цільове функціональне призначення	Переваги методу	Обмеження щодо застосування
Імітаційне моделювання	Віртуальне тестування сценаріїв поведінки складних систем	Максимальна точність, можливість врахування стохастичних факторів	Висока вартість спеціалізованого ПЗ та трудомісткість розробки
Лінійне програмування	Оптимізація розподілу обмежених ресурсів та мінімізація витрат	Формальна строгість, швидкість знаходження оптимальних рішень	Ризик надмірного спрощення реальних технологічних обмежень
Факторний аналіз	Декомпозиція та структурування ключових чинників впливу	Чітка структуризація причинно-наслідкових зв'язків	Обмеженість при врахуванні нелінійних взаємозалежностей

Систематизація методів моделювання у транспортній логістиці відповідно до їхнього функціонального призначення та ієрархічного рівня управління (операційний, тактичний, стратегічний) дозволяє виокремити чітку структуру їх застосування. Статистичні підходи орієнтовані на дескриптивний аналіз наявного стану логістичних процесів, тоді як оптимізаційні моделі виступають інструментом нормативного планування використання ресурсів компанії.

Імітаційні моделі виконують предиктивну функцію, відтворюючи реакцію логістичної системи на кризові збурення, а факторний аналіз забезпечує пріоритезацію напрямів оптимізації через визначення найбільш чутливих змінних системи (таких як індекс цін на пальне чи рівень затримок на прикордонних пунктах пропуску).

Таким чином, оцінювання та моделювання економічної ефективності логістичних операцій має базуватися на синергії кількісних аналітичних показників, сучасного математичного апарату та цифрових інструментів. Це дозволяє не лише здійснювати аудит слабких місць транспортної системи, а й проектувати гнучкі адаптивні стратегії розвитку, релевантні умовам невизначеності та динамічним викликам зовнішнього середовища.

1.3 Оптимізація логістичних процесів в умовах макроекономічної та безпекової нестабільності

У періоди дестабілізації функціонування ринків, що зумовлена екзогенними загрозами, руйнуванням інтермодальних ланцюгів постачання та жорстким дефіцитом ресурсного забезпечення, завдання оптимізації логістичних процесів набуває стратегічного значення. Якщо за стаціонарного стану економічного середовища критеріями оптимізації транспортно-логістичних систем є мінімізація сукупних операційних витрат і максимізація продуктивності, то в умовах високої турбулентності пріоритет переміщується у площину забезпечення безперервності матеріальних потоків, підвищення адаптивності системи та диверсифікації логістичних ризиків.

Ефективним методологічним інструментарієм оптимізації за умов невизначеності є економіко-математичне моделювання, яке дозволяє формалізувати параметри логістичних систем та мінімізувати цільову функцію за наявності системи обмежень. Базовим базисом у цьому контексті виступає класична транспортна задача, критерієм якої є мінімізація сукупних витрат на транспортування за умови повного задоволення попиту в пунктах споживання та вичерпання наявних обсягів потужностей у пунктах відправлення.

Класична математична постановка транспортної задачі має такий вигляд:

$$\min Z = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n c_{ij} \times x_{ij} \quad (1.6)$$

за умов:

$$\sum_{j=1}^n x_{ij} = a_i, i = 1, \dots, m \quad (1.7)$$

$$\sum_{i=1}^m x_{ij} = b_j, j = 1, \dots, n \quad (1.8)$$

$$x_{ij} \geq 0 \quad (1.9)$$

де x_{ij} — кількість вантажу, що транспортується від постачальника і до споживача

c_{ij} — вартість перевезення одиниці вантажу;

a_i, b_j — запаси і потреби відповідно.

В умовах нестабільного макросередовища класична транспортна модель підлягає модифікації шляхом інтеграції стохастичних коефіцієнтів ризику для кожного дугового сегмента мережі, введення часових обмежень (вікон доставки), а також урахування дискретної доступності транспортних коридорів та пріоритетності вантажопотоків (зокрема, стратегічного та гуманітарного призначення). Науково доведено, що подібне розширення параметричного контуру моделі дозволяє знизити втрати логістичних ресурсів орієнтовно на 25% за рахунок превентивного врахування ймовірності блокування або руйнування елементів транспортної інфраструктури.

Додатковим релевантним інструментом є графове моделювання логістичної системи, у якому логістичні вузли (хаби, термінали) детерміновані як вершини графа, а транспортні зв'язки між ними — як дуги з вектором характеристик (вартість, тривалість транзиту, коефіцієнт безпекового ризику). Для ідентифікації найкоротших та найменш ризикованих маршрутів у мультимодальних мережах застосовують методи теорії графів, зокрема алгоритм Дейкстри. Перевагою даного підходу є можливість знаходження оптимального

шляху за критерієм мінімальних сукупних витрат, а також високий рівень адаптивності алгоритму до динамічних збурень (динамічна зміна пропускної здатності, блокування ділянок доріг, коливання вартості паливно-енергетичних ресурсів тощо) (рис. 1.4).



Рисунок 1.4 — Оптимізація маршрутів доставки за інтегральним критерієм ризиків та витрат

На наведеній графовій схемі орієнтованими дугами позначено альтернативні траєкторії переміщення матеріальних потоків. Кожна дуга характеризується ваговою функцією, яка відображає інтегральний показник, що поєднує безпекові ризики (загрози воєнного характеру, логістичні блокади) та калькуляційні витрати (витрати пального, часовий ресурс). Пріоритетними визначено маршрути, які забезпечують мінімальне значення цільової функції за визначеною системою критеріїв.

За умов нестабільності критичного значення набуває реорганізація систем управління запасами. Якщо за стаціонарних ринкових умов базовим інструментом є модель економічно обґрунтованого замовлення (\$EOQ\$), то в умовах товарного дефіциту та форс-мажорних обставин вищу ефективність демонструють адаптивні стратегії. Вони базуються на формуванні динамічних буферних резервів, урахуванні стохастичного характеру затримок у ланцюгах постачання та дискретності попиту. Порівняльний аналіз концептуальних підходів до управління запасами систематизовано в табл. 1.5.

Таблиця 1.5 — Компаративний аналіз підходів до управління запасами

Параметр порівняння	Класична модель EOQ	Адаптивна модель із буферизацією
Урахування латенції та затримок поставок	Відсутнє (припускається детермінованість)	Наявне (стохастичний облік)
Оцінка ризику виникнення дефіциту	Обмежена	Високий рівень релевантності
Параметри гнучкості поповнення	Фіксований обсяг партії	Динамічна оптимізація параметрів
Релевантність в умовах правового режиму воєнного стану	Низька	Висока

Перспективним вектором оптимізації є сценарне моделювання логістичних процесів, що передбачає декомпозицію можливих варіантів розвитку подій на дискретні сценарії (базовий, песимістичний, критичний) із розробкою відповідних операційних алгоритмів для кожного з них. Цей підхід є детермінантним для гуманітарної логістики та управління процесами у зонах збройних конфліктів або техногенних катастроф. Його впровадження забезпечує високу швидкість реакції системи шляхом динамічної реконфігурації маршрутів, диверсифікації обсягів та зміни схем комунікативної взаємодії. Структурну архітектуру сценарного планування логістичних процесів відображено на рис. 1.5.



Рисунок 1.5 — Структурна архітектура сценарного планування логістики

Значну ефективність також демонструє імітаційне моделювання, реалізоване у спеціалізованих програмних середовищах (*FlexSim*, *AnyLogic*, *Arena*), що дозволяє створювати цифрові клони логістичних ланцюгів та тестувати їхню стійкість (стрес-тестування) до екзогенних дестабілізуючих факторів. Це дає змогу менеджменту превентивно ідентифікувати «вузькі місця» (bottlenecks) та розробляти заходи щодо демпфування ризиків. Дослідження свідчать, що інтеграція методів машинного навчання (Machine \ Learning\$) у прогностичні моделі логістичних сценаріїв дозволяє скоротити середню тривалість інтервалу доставки на величину до 17% навіть за умов глибокої кризи.

У критичних умовах (форс-мажорні обставини, пандемії, збройні конфлікти) спостерігається конвергенція комерційної та гуманітарної логістики. Функціонування ланцюгів доставки гуманітарних вантажів вимагає специфічних механізмів координації з інститутами державного управління, НУО та міжнародними інституціями. За таких умов до оптимізаційних моделей вводяться параметри пріоритетності та обмеженого інфраструктурного доступу. Зокрема, гуманітарні потоки отримують найвищий пріоритет на лімітованих за пропускною здатністю або критичних за рівнем ризику ділянках мережі. Дані процеси досліджуються в межах спеціалізованого наукового напрямку —

humanitarian logistics (гуманітарна логістика), методологічну основу якого становить сценарне проектування, проактивний ризик-менеджмент та концепція гнучкого реагування (*Agile Logistics*).

Таким чином, оптимізація логістичних процесів у періоди макроекономічної нестабільності трансформується із засобу зниження операційних витрат на інструмент забезпечення живучості, стійкості та гнучкості транспортно-логістичної системи. Синтез моделей транспортної задачі, адаптивного керування запасами, графових, імітаційних моделей та сценарного планування дозволяє суб'єктам господарювання ефективно нівелювати загрози зовнішнього середовища та зберігати конкурентоспроможність у деструктивних умовах.

Світовий досвід функціонування транспортних систем у кризових ситуаціях (під час воєнних дій, епідеміологічних криз чи масштабних міграційних процесів) вказує на невідкладність кардинальної зміни традиційних парадигм управління. Найвищий рівень операційної стійкості демонструють системи, які базуються на принципах експрес-адаптації, цифрової трансформації та динамічного планування. Провідні глобальні логістичні оператори (*Maersk, UPS, DHL*) у відповідь на сучасні виклики активно імплементують концепцію «цифрових двійників» (*Digital Twins*) — віртуальних аналогів реальних транспортно-логістичних систем. Це дозволяє здійснювати проактивне моделювання ризикових ситуацій, діяти на випередження та мінімізувати потенційні збитки шляхом завчасного розрахунку резервних варіантів маршрутизації та крос-докінгу.

В умовах гуманітарної та інфраструктурної кризи, зумовленої військовою агресією проти України, Республіка Польща продемонструвала високу ефективність оперативного реагування: розгортання тимчасових прикордонних логістичних хабів дозволило суттєво нівелювати залежність від заблокованих чи деструктурованих елементів транспортної мережі. Безперервність ланцюгів

постачання (насамперед критичного імпорту) була забезпечена за рахунок використання мобільних складських комплексів, модульних сортувальних центрів та впровадження систем наскрізного цифрового моніторингу вантажопотоків (*Supply Chain Visibility*).

Вагоме наукове підґрунтя для оцінки релевантності таких рішень для вітчизняної практики міститься у працях Гірної та Петляківського, де наголошено на пріоритетності розробки адаптивних логістичних стратегій, що здатні функціонувати в умовах високої стохастичності. Економіко-математичне моделювання у цьому контексті виступає базисом не лише для калькуляції витрат на транспортування, а й для кількісного оцінювання вектора впливу екзогенних ризиків на ключові логістичні вузли. Зазначений підхід формує основу багатосценарного планування, що передбачає побудову альтернативних траєкторій розвитку системи (базового, загрозливого та критичного сценаріїв) із розрахунком їхніх фінансово-економічних наслідків для підприємства.

Особливого наукового інтересу набуває стратегія диверсифікації логістичних ресурсів. Сучасні архітектури стійких логістичних систем відкидають принципи моноканальності. Навпаки, синергетичне поєднання кількох видів транспорту (мультимодальні та інтермодальні перевезення із залученням автомобільного, залізничного та річкового транспорту), географічна диверсифікація маршрутів руху та формування просторово розосередженої мережі резервних складських потужностей дозволяють створити адаптивну мережу, яка зберігає функціональність за будь-яких критичних сценаріїв.

Цей підхід є безальтернативним для вітчизняних підприємств з огляду на перманентні безпекові загрози, дестrukцію традиційних логістичних коридорів та жорсткі ліміти ресурсів. Трансфер передового міжнародного досвіду через впровадження цифрових моделей, розгортання резервної інфраструктурної мережі та планування на основі багатоваріантних сценаріїв є критично необхідною умовою стабілізації та подальшого розвитку транспортно-

логістичного комплексу України в період воєнного стану та поствоєнної реконструкції.

Для систематизації специфіки організації логістичної діяльності в умовах нестабільності доцільно провести компаративний аналіз стратегій, що застосовуються у вітчизняній практиці та у провідних країнах світу. У табл. 1.6 наведено ключові розбіжності, а також ідентифіковано елементи, які підлягають імплементації в національну практику з урахуванням специфіки воєнного стану.

Таблиця 1.6 — Порівняльна характеристика логістичних стратегій в умовах кризових явищ

Критерій порівняння	Практика України (період 2022–2026 рр.)	Міжнародна практика (Польща, Ізраїль, Сінгапур, НАТО)
Стратегічний підхід до планування	Переважно реактивний (адаптація ex post — після настання ризикової події)	Превентивний, сценарне проектування, проактивний ризик-менеджмент
Методи маршрутизації	Оперативне обходження заблокованих чи зруйнованих інфраструктурних ділянок	Наперед детерміновані резервні коридори, цифрове моделювання потоків
Архітектура складської інфраструктури	Дефіцит резервних площ, висока концентрація потужностей у зонах підвищеного ризику	Просторово розосереджена (диверсифікована) система мобільних та тимчасових хабів
Технологічний рівень (діджиталізація)	Часткова автоматизація окремих ланок, дискретне функціонування IT-інфраструктури	Наскрізна діджиталізація: інтегровані системи TMS, GPS-трекінг, «цифрові двійники»

Критерій порівняння	Практика України (період 2022–2026 рр.)	Міжнародна практика (Польща, Ізраїль, Сінгапур, НАТО)
Еластичність транспортної мережі	Обмежена, високий рівень залежності від моноканальних магістральних вузлів	Висока гнучкість: розгалужені інтермодальні ланцюги, мультивидовий транспорт
Математичний апарат оптимізації	Класична транспортна задача, базові елементи імітаційного моделювання	Комплексне імітаційне, сценарне та мультиагентне моделювання систем
Система ризик-менеджменту	Локалізація наслідків криз на мікрорівні без системного картографування ризиків	Перманентний моніторинг, побудова карт ризиків (<i>risk mapping</i>), стрес-тестування
Характер державного регулювання	Реактивне інтервенційне втручання, дискретне надання преференцій	Інституційна підтримка, субсидування, нормативно-правова дерегуляція логістики при НС

Отже, результати компаративного аналізу сучасних логістичних стратегій свідчать, що найбільшу ефективність в умовах високої турбулентності демонструють системи, які гармонійно поєднують превентивне планування, мультимодальні транспортні рішення, диверсифіковані інфраструктурні потужності та інтегроване інформаційне забезпечення. Водночас у вітчизняній практиці впровадження зазначених підходів перебуває на початковій стадії та має фрагментарний характер (на рівні окремих корпоративних структур чи логістичних консорціумів).

Наявні інфраструктурні та організаційні обмеження не нівелюють потенціал розвитку галузі, а, навпаки, визначають траєкторію модернізації транспортно-логістичної системи України в напрямку її інтеграції та синхронізації з європейськими стандартами. Одним із домінантних векторів цієї модернізації має стати масштабне впровадження методів економіко-математичного моделювання та високотехнологічних цифрових систем управління, що забезпечить належну стійкість, адаптивність та швидкість ухвалення управлінських рішень в умовах високого ступеня невизначеності.

Зовнішнє середовище, у якому функціонують підприємства транспортно-логістичного комплексу в умовах воєнного стану, характеризується високим рівнем динамічності, нестабільності та багатofакторності. Для системного дослідження та класифікації екзогенних факторів, що чинять деструктивний або стимулюючий вплив на логістичні операції, доцільно застосувати метод PEST-аналізу, який дозволяє структурувати фактори за чотирма стратегічними макрогрупами: політико-правові, економічні, соціо-демографічні та технологічні.

Політико-правові фактори в умовах дії правового режиму воєнного стану мають домінантний вплив на архітектуру логістичних рішень. До цієї групи належать: нормативно-правові обмеження на рух транспортних засобів у комендантську годину та у прифронтових зонах; закриття окремих повітряних, морських та сухопутних коридорів для цивільного сполучення; мобілізаційні заходи, що безпосередньо коригують баланс трудових ресурсів; державне регулювання та встановлення пріоритетності для вантажів стратегічного та гуманітарного призначення. Важливе значення має також трансформація митного законодавства (спрощення процедур митного оформлення, податкові преференції для суб'єктів транспортного ринку тощо). Ці фактори формують динамічний контур державного регулювання, що вимагає від логістичного менеджменту найвищого рівня адаптивності.

Економічні фактори відображають вплив макроекономічної дестабілізації на вартісні параметри логістичної діяльності. Ключовими детермінантами тут є: висока волатильність та зростання цін на паливно-мастильні матеріали; девальваційні та інфляційні процеси, що зумовлюють подорожчання технічного обслуговування та ремонту рухомого складу; підвищення вартості запозичення капіталу (кредитних ресурсів) для суб'єктів малого та середнього бізнесу. Інфляційний тиск безпосередньо трансформує собівартість логістичних послуг, нівелює рентабельність транспортних операцій та змушує компанії постійно проводити ревізію та коригування тарифної політики.

Соціо-демографічні фактори пов'язані з масштабними міграційними процесами, релокацією виробничих підприємств, мобілізацією працездатного населення та просторовою трансформацією споживчого попиту. Географічне переміщення населення та бізнесу генерує нові просторові вектори матеріальних потоків (зокрема, евакуаційні потоки та доставку збірних гуманітарних вантажів). Водночас критичний дефіцит висококваліфікованих кадрів (насамперед водіїв категорії С/С1, логістів-аналітиків) виступає потужним деструктивним чинником для операційної діяльності транспортних компаній.

Технологічні фактори визначають потенційні драйвери розвитку та модернізації галузі навіть у кризових умовах. Інтенсифікація використання цифрових інструментів, таких як супутникова GPS/Galileo навігація, телеметричний онлайн-моніторинг рухомого складу, хмарні системи управління транспортом (TMS — Transportation \ Management \ Systems), дозволяє здійснювати динамічну оптимізацію маршрутів у режимі реального часу. Спостерігається стійкий тренд до інтеграції технологій Big Data, предиктивної аналітики ризиків та концепції інтегрованого планування. Проте просторова неоднорідність доступу до телекомунікаційної інфраструктури (руйнування базових станцій зв'язку, відключення енергопостачання) створює технологічні диспропорції.

Таким чином, макросередовище функціонування логістичних систем в умовах воєнного стану є складним, диверсифікованим та високоризиковим. Його динаміка вимагає від суб'єктів господарювання не лише операційного реагування, а й розробки прогностичних економетричних моделей, здатних враховувати синергетичний ефект зазначених груп факторів. Отримані за результатами PEST-аналізу дані слугують інформаційним базисом для побудови економіко-математичних моделей оптимізації транспортних процесів у наступних розділах наукового дослідження.

Висновки до першого розділу

У першому розділі кваліфікаційної роботи здійснено комплексний теоретико-методологічний аналіз логістичних процесів, визначено їхню архітектуру в системі забезпечення стійкості національної економіки та ідентифіковано специфіку функціонування транспортних систем в умовах дії правового режиму воєнного стану. Результати проведеного дослідження дозволили сформулювати такі наукові висновки:

1. Доведено, що логістична система виступає однією з ключових детермінант забезпечення життєздатності та стійкості підприємства в умовах макроекономічної дестабілізації. Ефективно організований логістичний менеджмент дозволяє забезпечити синхронізацію поставок, мінімізувати часові лаги реакції на ринкові запити та підтримувати сталість зв'язків між контрагентами. У кризовий період логістична функція трансформується з інструменту мінімізації витрат у стратегічний фактор забезпечення безперервності операційного циклу підприємства.

2. Ідентифіковано та систематизовано критичні виклики, з якими стикаються суб'єкти транспортного ринку (руйнування лінійної та точкової інфраструктури, блокування традиційних транспортних коридорів, дефіцит та

волатильність цін на енергоносії, збільшення інтервалу доставки, ризику втрати або псування вантажів). Обґрунтовано, що за таких умов класичні (детерміновані) логістичні підходи втрачають свою ефективність, а ухвалення рішень на основі евристичних або інтуїтивних методів є нерелевантним. Це зумовлює об'єктивну необхідність переходу до системної парадигми управління транспортними процесами.

3. Проаналізовано систему показників (KPI) оцінювання ефективності логістичної діяльності. Визначено, що поряд із традиційними метриками (коефіцієнт оборотності запасів, питома собівартість логістичних послуг, рівень утилізації вантажопідйомності транспортних засобів, показники OTIF — On-Time-In-Full) особливого значення набуває застосування економіко-математичного апарату. Використання транспортних задач, методів лінійного та стохастичного програмування, факторного аналізу та сценарного моделювання надає можливість здійснювати предиктивну оцінку наслідків управлінських рішень.

4. Досліджено методичний інструментарій оптимізації логістики за умов високої турбулентності зовнішнього середовища. До базових методів віднесено: модифікацію математичних моделей транспортної задачі з урахуванням коефіцієнтів ризику; впровадження адаптивних стратегій управління запасами; застосування сценарного планування та інструментів імітаційного моделювання; інтеграцію сучасних цифрових технологій (GIS, IoT, Big \ Data, Machine \ Learning). Окремо виділено методологію гуманітарної логістики, яка функціонує за умов жорстких ресурсних та безпекових обмежень за відсутності класичних ринкових регуляторів.

5. На основі узагальнення передового міжнародного досвіду управління транспортно-логістичними системами в умовах криз і збройних конфліктів доведено універсальність таких стратегічних рішень, як: географічна диверсифікація маршрутів, децентралізація та розосередження складської

мережі, побудова «цифрових двійників» ланцюгів постачання, створення мультимедійних центрів ухвалення рішень та інтеграція логістичної стратегії у загальний контур стратегічного менеджменту підприємства.

6. За допомогою методології PEST-аналізу формалізовано та структуровано вектор впливу макросередовища на транспортно-логістичні процеси. Політико-правові обмеження (режими пересування, ліміти пропускної здатності), економічні збурення (інфляція, калькуляційні ризики), соціальні трансформації (дефіцит водійського та управлінського персоналу *akibat* міграції та мобілізації) та асиметрія технологічного розвитку формують комплексне стохастичне середовище, що вимагає розробки гнучких рішень.

Узагальнюючи вищевикладене, констатовано, що в сучасних умовах ефективність логістичної діяльності визначається не лише традиційними критеріями швидкості чи вартості, а й інтегральними параметрами гнучкості, адаптивності та живучості системи. Зазначене актуалізує необхідність моделювання логістичних рішень із застосуванням кількісних методів та урахуванням коефіцієнтів безпекових ризиків, що формує теоретико-методологічне підґрунтя для розробки авторської економіко-математичної моделі у наступному розділі роботи.

2 ЕКОНОМІКО-МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ЛОГІСТИЧНИХ ОПЕРАЦІЙ В УМОВАХ ВОЄННОГО СТАНУ

2.1 Фінансово-економічна характеристика та аналіз операційного середовища підприємств

В умовах дії правового режиму воєнного стану зафіксовано суттєве зростання операційних витрат транспортно-логістичних підприємств, що є закономірним наслідком деструктивних макроекономічних процесів. Трансформації зазнали ключові складові собівартості перевезень: відбулося стрімке зростання вартості паливно-мастильних матеріалів, збільшилися капітальні витрати на підтримання належного технічного стану та обслуговування рухомого складу в умовах дефіциту автокомпонентів, зросли витрати на оплату праці кваліфікованого водійського персоналу, а також суттєво підвищилися транзакційні витрати, пов'язані з митним адмініструванням, оплатою за використання інфраструктури (платні дороги в країнах ЄС) та придбанням витратних матеріалів.

Логістична система під впливом факторів воєнного стану зазнала масштабних викликів, які за своїм вектором та силою впливу виходять далеко за межі стандартних операційних ризиків. Основні деструкції були викликані жорсткими фізичними та просторовими обмеженнями щодо мобільності транспортних засобів, геополітичними рішеннями суміжних держав, дефіцитом паливних ресурсів та гіперінфляційним зростанням вартості матеріально-технічного забезпечення.

Серед ключових проблем, які безпосередньо лімітували фінансово-економічну ефективність діяльності підприємств, виокремлено такі:

- 1. Екстремальні заторні явища та тривалі затримки на митних пунктах пропуску** (зокрема, на українсько-польській ділянці державного

кордону), тривалість яких у пікові періоди становила від 7 до 10 діб. Це зумовлювало непродуктивні витрати пального (робота двигунів та автономних рефрижераторних установок на стоянках), різке зниження коефіцієнта оборотності рухомого складу, порушення строків доставки (delayed \ delivery) та ризику часткового чи повного псування вантажів (особливо швидкопсувної продукції у разі збоїв у забезпеченні температурного режиму).

2. **Технічні відмови та поломки холодильного (рефрижераторного) обладнання під час виконання рейсів.** За умов дефіциту спеціалізованих запасних частин та високої вартості послуг сервісних станцій на території країн ЄС, дані інциденти створювали пряму загрозу експертної утилізації вантажу через порушення «холодового ланцюга» (cold \ chain).

3. **Дорожньо-транспортні пригоди (ДТП), включаючи перевернення транспортних засобів.** Попри відносно низьку частоту виникнення, зазначені події класифікуються як критичні ризики, оскільки вони призводять до кумулятивних збитків: повної втрати (знищення) товарно-матеріальних цінностей та безповоротної втрати активу у вигляді рухомого складу.

4. **Протиправні посягання на майно (крадіжки пального з баків транспортних засобів та вантажів)** на автостоянках у Франції та інших країнах Західної Європи. Дана проблема актуалізувала потребу у додаткових капіталовкладеннях у системи безпеки та інструменти телеметричного моніторингу в режимі Real \ Time.

5. **Надлімітне завантаження транспортних засобів (перевантаження),** яке часто ініціюється вантажовідправниками з метою максимізації обсягу партії товару та зниження питомих транспортних витрат на одиницю продукції. Це призводить до порушення нормативних вимог щодо вагових параметрів, генерації високих штрафних санкцій з боку контролюючих

органів (*WIM-системи, транспортний контроль в ЄС*) та прискореного зносу елементів підвіски і трансмісії автомобілів.

6. Геополітичні та соціально-економічні блокади прикордонних пунктів пропуску, зокрема акції протесту з боку польських перевізників та аграріїв, які протягом 2023–2024 рр. дискретно паралізували рух українського експортно-імпортного транспорту, руйнуючи сталі графіки доставки.

На рис. 2.5 наведено матричну оцінку основних логістичних ризиків за критеріями ймовірності (частоти) їх виникнення та стратегічної сили впливу на фінансово-господарську діяльність підприємства:

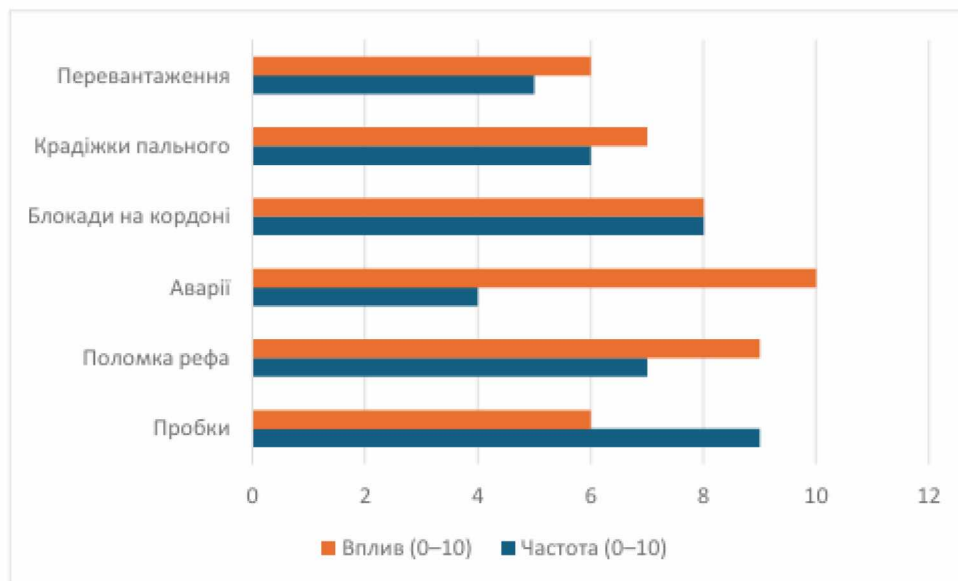


Рисунок 2.1 — Матриця оцінки основних логістичних ризиків підприємства

За результатами матричного аналізу встановлено, що найбільшу частоту виникнення мають заторні явища на кордонах та інфраструктурні блокади, тоді як найвищий рівень критичності (сили впливу) притаманний дорожньо-транспортним пригодам та технічним відмовам рефрижераторних систем, оскільки вони безпосередньо корелюють із фізичним збереженням вантажу.

З метою нівелювання та демпфування зазначених викликів підприємством було розроблено та впроваджено комплекс антикризових заходів:

- Формування динамічних резервних маршрутів та диверсифікація логістичних коридорів (переорієнтація вантажопотоків через пункти пропуску в Угорщині та Словаччині);
- Впровадження систем наскрізного моніторингу руху транспортних засобів у режимі реального часу на базі технологій GPS та супутникової телеметрії;
- Інтеграція цифрових бездротових датчиків для перманентного дистанційного контролю температурно-вологісного режиму всередині напівпричепів-рефрижераторів;
- Створення автономних корпоративних резервів паливно-мастильних матеріалів та критичної номенклатури запасних частин;
- Перехід на цифрове планування та оптимізацію маршрутизації з використанням спеціалізованого ПЗ, що враховує динамічний профіль ризиків.

Узагальнюючи, досліджувані підприємства продемонстрували високий рівень адаптивності та операційної гнучкості за умов турбулентного стану зовнішнього середовища. Це дозволило не лише зберегти ринкові позиції та забезпечити фінансову стійкість, а й масштабувати операційну діяльність на ринку міжнародних перевезень у країнах ЄС шляхом оптимізації топології логістичної мережі та раціоналізації структури витрат.

2.2 Оцінка логістичної діяльності підприємства

В умовах воєнного стану ефективність логістичної діяльності стає визначальним чинником стабільності та виживання транспортних підприємств. Спроможність зберігати прибутковість і надійність логістичних процесів безпосередньо залежить від впровадження сучасних цифрових рішень,

постійного моніторингу витрат, управління ризиками та оперативного аналізу ключових показників.

Центральним інструментом управління бізнес-процесами на досліджуваному підприємстві виступає інтегроване поєднання систем SAP та «1С:Підприємство». У системі SAP здійснюється стратегічне й оперативне планування логістичних маршрутів, фінансовий менеджмент, а також загальна координація структурних підрозділів. Система «1С» слугує універсальною базою даних для обліку логістичних рейсів. У ній детально фіксуються:

- дати виконання перевезень;
- географія маршрутів (країни та конкретні пункти);
- витрати на кожен окремий рейс;
- доходи від фрахту;
- непередбачувані затримки та аварійні ситуації;
- дані про заправки та технічне обслуговування автотранспорту;
- дотримання температурного режиму.

Такий рівень деталізації дозволяє аналітичним відділам компанії здійснювати глибокий аналіз ефективності як на рівні окремого маршруту, так і в масштабах усього підприємства.

Для моніторингу транспортних засобів у режимі реального часу компанія використовує сучасні GPS-системи: Wialon, TruckTrans та Globass. Вони забезпечують контроль за місцезнаходженням фур, динамікою виконання рейсів, тривалістю зупинок, швидкістю пересування та фактами відхилення від заданого треку. Важливою перевагою цих систем є їхня інтеграція з температурними датчиками рефрижераторів. Це дозволяє безперервно контролювати дотримання «холодового ланцюга», що є критично важливим під час транспортування медикаментів, замороженої продукції, а також свіжих овочів та фруктів.

Супровідна документація (від митних декларацій до товарно-транспортних накладних) обробляється через платформу електронного документообігу (ЕДО)

M.E.Doc. Це пришвидшує оформлення рейсів, мінімізує ризики втрати паперових носіїв, запобігає податковим помилкам і гарантує збереження даних на серверах із автоматичним резервним копіюванням.

Додатково для щоденного оперативного обліку застосовуються інструменти Google Таблиці та MS Excel. У них ведеться первинний запис фрахтів, здійснюються попередні розрахунки витрат, моніторинг преміювання, штрафів та доплат водіям, а також формуються короткострокові управлінські звіти. Згодом ці дані консолідуються та переносяться до системи «1С» для глибшої ретроспективної обробки. Загальна характеристика інформаційного контуру підприємства наведена в табл. 2.3.

Таблиця 2.3 – Інформаційні системи, що використовуються підприємством

Система	Призначення
SAP	Планування логістичних, фінансових та адміністративних процесів компанії.
1С:Підприємство	Агрегація даних про рейси, маршрути, витрати; аналітичний облік перевезень.
Wialon	GPS-моніторинг автотранспорту в реальному часі, телеметрія та контроль температури.
TruckTrans	Альтернативний моніторинг руху транспорту та зчитування технічних параметрів ТЗ.
Globass	Трекінг, підтримання зв'язку з водієм, фіксація та аналіз зупинок.
M.E.Doc	Електронний документообіг, реєстрація ТТН, податкова та статистична звітність.
Excel / Google Таблиці	Оперативні калькуляції, облік фрахтів, гнучкий поточний контроль витрат.

Високий ступінь деталізації історичних даних у базі «ІС» створює надійний фундамент для впровадження методів математичного та статистичного моделювання. Хоча на сьогодні такі інструменти, як оптимізаційні транспортні задачі та імітаційне моделювання, ще не реалізовані у повному обсязі, підприємство має високу інформаційну готовність до їх масштабування. Наявність репрезентативної вибірки за минулі періоди (про витрати, ризики, затримки та форс-мажори) дозволяє будувати адаптивні моделі управління логістикою навіть в умовах високої макроекономічної нестабільності.

У найближчій перспективі використання таких моделей дозволить автоматично підбирати оптимальні маршрути з урахуванням погодних умов, політичних ризиків, прикордонних блокад та історичної специфіки рейсів. Це підвищить швидкість прийняття рішень, мінімізує людський фактор і закладе основу для проактивного ризик-менеджменту. Отже, інформатизація підприємства є не лише інструментом підтримки поточних операцій, а й базою для переходу до інтелектуального управління логістикою на основі предиктивної аналітики.

Фінансова та операційна результативність міжнародних перевезень безпосередньо залежить від таких параметрів, як середня відстань рейсу, ставка фрахту, час доставки, витрати на ТО, ціни на паливе та загальна маржинальність маршрутів. Під впливом воєнного стану ці показники зазнали негативних змін — зросла їхня витратна частина та суттєво знизилася передбачуваність логістичних циклів.

Для повної оцінки ефективності логістичної системи підприємства у 2024 році було розраховано систему класичних фінансово-економічних та логістичних коефіцієнтів (табл. 2.4).

Таблиця 2.4 – Ключові фінансово-логістичні коефіцієнти перевезень (2024 рік)

Коефіцієнт	Формула	Призначення	Значення (2024 рік)
Коефіцієнт рентабельності перевезень	Прибуток від перевезень / Собівартість перевезень	Ефективність логістичних витрат	0,26
Оборотність активів	Виручка від перевезень / Середньорічна вартість активів	Ресурсна ефективність використання активів	1,38
Маржинальний дохід на рейс	Фрахт за рейс – Змінні витрати на рейс	Частка доходу від рейсу, що покриває постійні витрати	18 000 грн
Коефіцієнт логістичної надійності	Кількість виконаних рейсів вчасно / Загальна кількість виконаних рейсів	Оцінка стабільності та пунктуальності доставки	0,93
Собівартість на 1 км (перевезень)	Загальна собівартість перевезень / Загальний кілометраж	Ефективність витрат на одиницю відстані	6,4 грн/км
Собівартість на 1 тонну (перевезень)	Загальна собівартість перевезень / Загальний тоннаж вантажу	Ефективність витрат на одиницю обсягу вантажу	312 грн/т

Аналіз даних таблиці 2.4 дозволяє зробити такі висновки:

- Коефіцієнт рентабельності перевезень (0,26)** свідчить, що на кожен гривню інвестованих логістичних витрат підприємство генерує 0,26 грн чистого прибутку. Показник є помірно позитивним, проте вказує на наявність резервів зростання за рахунок оптимізації маршрутів.
- Оборотність активів (1,38)** демонструє, що активи компанії здійснюють понад один повний оборот за рік. Це підтверджує достатню ефективність використання ресурсної бази в обмежених умовах воєнного часу.
- Маржинальний дохід на рейс (18 000 грн)** відображає суму, яка залишається після покриття прямих змінних витрат (паливе, заробітна плата водія, дорожні збори) для забезпечення покриття постійних витрат підприємства та формування чистого прибутку.
- Коефіцієнт логістичної надійності (0,93)** вказує на те, що 93% рейсів виконуються без порушення нормативних строків. Це високий показник

для ринку, що підтверджує конкурентоспроможність компанії та зміцнює клієнтську довіру.

5. **Питома собівартість (6,4 грн/км та 312 грн/т)** є економічно обґрунтованою та відповідає середньоринковим трендам, враховуючи стрибки цін на паливно-мастильні матеріали.

Для аналізу географічної специфіки логістичних операцій було систематизовано узагальнені показники ефективності рейсів за ключовими європейськими напрямками (табл. 2.5).

Таблиця 2.5 – Показники ефективності логістичних операцій за країнами

Країна призначення	Середній фрахт, грн	Час доставки, днів	Відстань (в обидва боки), км	Собівартість рейсу, грн	Прибуток, грн
Німеччина	245 000	10	4 000	183 000	62 000
Франція	255 000	11	4 500	190 000	65 000
Іспанія	270 000	13	7 000	202 000	68 000
Греція	260 000	14	8 000	198 000	62 000
Нідерланди	250 000	10	5 000	185 000	65 000

Середня ставка фрахту коливається в межах 245–270 тис. грн. Найбільш витратними є рейси до Іспанії та Греції через значну протяжність маршрутів (понад 7–8 тис. км у кругорейсі). Проте рентабельність за всіма напрямками стабільно утримується на рівні біля 25%.

Час доставки варіюється від 10 днів (Німеччина, Нідерланди) до 13–14 днів (Іспанія, Греція). Окрім чистого географічного фактора, на тривалість рейсів суттєво впливають непередбачувані затримки на митних пунктах пропуску, черги та штучні блокування кордонів.

Співвідношення фінансових параметрів (собівартості та прибутку) за країнами наочно представлено на рис. 2.6, а аналіз просторово-часових характеристик маршрутів відображено на рис. 2.7 та рис. 2.8.

Графічний аналіз дозволяє виявити певні аномалії у логістичних ланцюгах:

- Напрямки до Німеччини та Чехії мають порівняно вищий час доставки відносно їхньої географічної близькості, що вказує на наявність «вузьких місць» на етапі митного оформлення чи складського опрацювання вантажів.
- Натомість транзитні маршрути до Франції чи Італії демонструють високу часову ефективність завдяки налагодженим коридорам проходження контролю.

Зіставлення цих даних дозволяє виявити найменш передбачувані ділянки та формалізувати цільові функції для оптимізаційних задач ризик-менеджменту.

Для відстеження короткострокових трендів було проаналізовано динаміку операційних параметрів за перший квартал 2025 року (табл. 2.7).

Таблиця 2.7 – Динаміка ключових логістичних показників (січень–квітень 2025 р.)

Показник	Січень	Лютий	Березень	Квітень
Витрати на паливо, тис. грн	820	860	880	920
Витрати на обслуговування, тис. грн	330	340	335	340
Середня тривалість виконання, год	28,5	27,2	29,0	30,4
Кількість порушень графіка доставки	9	11	8	13

Спостерігається стійке зростання витрат на паливо через подорожчання нафтопродуктів у весняний період 2025 року. У квітні також зафіксовано збільшення середнього часу виконання рейсів та зростання кількості порушень графіків, що викликано посиленням безпекового контролю на блокпостах та внутрішніми обмеженнями пересування. Це обґрунтовує необхідність динамічного включення факторів часового ризику та цінових коливань пального як вагових параметрів до загальної оптимізаційної математичної моделі компанії.

Візуалізація загальних тенденцій вартості перевезень та часу доставки наведена на рис. 2.9.

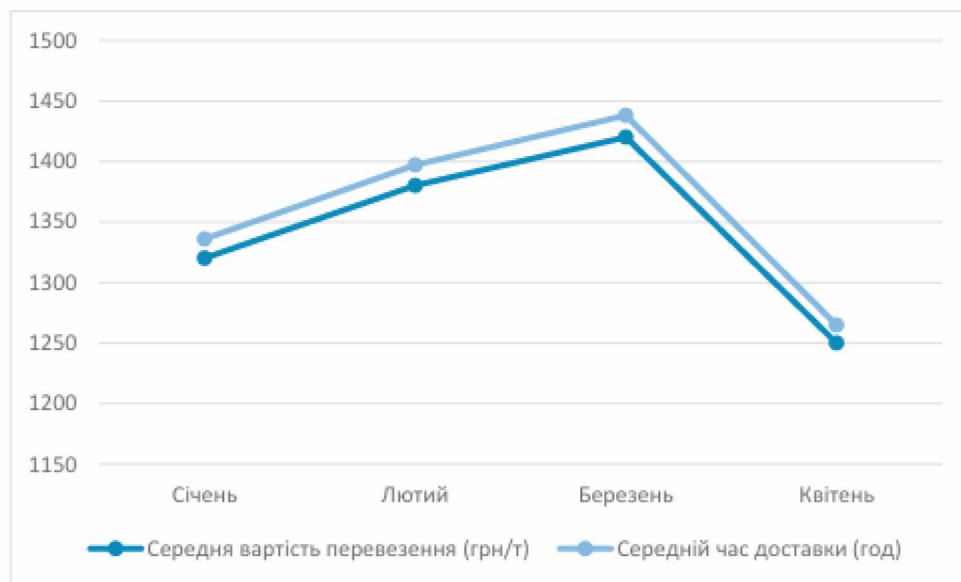


Рисунок 2.9 – Динаміка логістичних показників у січні - квітні 2025 року

Завдяки впровадженню у березні–квітні 2025 року комплексу управлінських рішень (гнучке перепланування рейсів в обхід Мостиської митниці, моніторинг збоїв у реальному часі), підприємству вдалося стабілізувати питомі витрати на тонну вантажу та оптимізувати часові параметри рейсів ближче до травня.

Для виявлення факторів, що мають найбільший деструктивний вплив на результати діяльності, було проведено кореляційний аналіз за методом Пірсона (табл. 2.8).

Таблиця 2.8 – Матриця кореляцій між логістичними показниками

Показник	Тривалість доставки	Вартість за 1 тонну	Кількість скарг
Тривалість доставки	1,00	0,91	0,95
Вартість перевезення за 1 т	0,91	1,00	0,88
Кількість клієнтських скарг	0,95	0,88	1,00

Розрахунки підтвердили наявність дуже високого лінійного зв'язку між тривалістю доставки та кількістю скарг клієнтів ($r = 0,95$). Також фіксується сильна кореляція між тривалістю рейсу та його вартістю ($r = 0,91$), оскільки будь-які простой та затримки автоматично генерують додаткові операційні витрати, збільшуючи собівартість послуг. З огляду на це, стратегічним пріоритетом підприємства є мінімізація часових втрат на маршрутах.

На сьогодні компанія успішно поєднує теоретичні та практичні інструменти економіко-математичного моделювання (табл. 2.9).

Таблиця 2.9 – Практичне використання методів моделювання в ПП «Транском Альянс»

Метод	Форма використання на підприємстві	Частота застосування	Результати / переваги
Транспортна задача	Оптимальний розподіл транспортних потоків між хабами	Щоденно	Мінімізація сукупного кілометражу та холостих пробігів
Факторний аналіз	Оцінка впливу окремих елементів витрат на фінансовий результат	Щомісяця	Визначення ключових драйверів зростання собівартості
Excel Solver (Пошук рішення)	Оперативне планування завантаження та розподілу ТЗ	Щоденно	Швидке формування рейсів з урахуванням поточних обмежень
Імітаційне моделювання	Сценарний аналіз («що-якщо») у випадку форс-мажорів	За потреби	Адаптація системи до повного перекриття окремих напрямків

Синтез цих методів дозволяє будувати комплексні моделі: результати факторного аналізу формують базу для економетричного оцінювання, а отримані рівняння регресії виступають обмеженнями в оптимізаційних моделях лінійного програмування.

Для практичної апробації розробленого підходу було проведено експериментальне моделювання в середовищі MS Excel (інструмент Solver) на прикладі трьох базових напрямків: Німеччина, Франція та Іспанія.

Умова задачі: Необхідно оптимально розподілити загальний обсяг замовлень у розмірі 1000 од. вантажу між трьома країнами. Критерій оптимізації — мінімізація сукупних логістичних витрат з урахуванням коефіцієнтів ризику. Вартість ризику інтегрована у цільову функцію за допомогою вагового коефіцієнта штрафу $\$ = 30\,000$ грн.

Вхідні параметри моделі наведено в табл. 2.10.

Таблиця 2.10 – Вхідні дані для моделі оптимізації

Країна	Максимально доступний обсяг, од.	Собівартість перевезення одиниці, грн	Коефіцієнт ризикy	Базовий час доставки, днів
Німеччина	600	183 000	0,15	10
Франція	700	190 000	0,20	12
Іспанія	800	202 000	0,25	14

Математична структура цільової функції мінімізації витрат з урахуванням ризик-компоненти має вигляд:

$$Z = \sum_i (c_i + \lambda \cdot r_i) \cdot x_i \quad (2.1)$$

де:

Z — цільова функція, яка представляє загальні витрати з урахуванням вартості перевезення та ризику.

c_i — собівартість перевезення з країни i

λ — ваговий коефіцієнт ризику (30 000 грн)

r_i — коефіцієнт ризику

x_i — обсяг вантажу

Результати розрахунку оптимальних параметрів розподілу потоків наведено в табл. 2.11.

Таблиця 2.11 – Результати оптимального розподілу логістичних обсягів

Країна	Обсяг (x_i), од.	Собівартість (c_i), грн/од.	Ризик (r_i)	Надбавка за ризик ($\lambda \cdot r_i$), грн	Сумарна вартість (на од.), грн	Загальна вартість, грн
Німеччина	400	183000	0,15	4500	187500	75000000
Франція	300	190000	0,2	6000	196000	58800000
Іспанія	300	202000	0,25	7500	209500	62850000

Модель закономірно спрямувала найбільшу частку вантажопотоку (400 од.) на німецький напрямок, оскільки він має мінімальні значення як базової собівартості, так і логістичного ризику. Більш ризиковані та дорогі напрямки (Франція та Іспанія) отримали обмежені обсяги розподілу (по 300 од.), що дозволило збалансувати фінансові результати. Візуальний розподіл часток наведено на рис. 2.10.

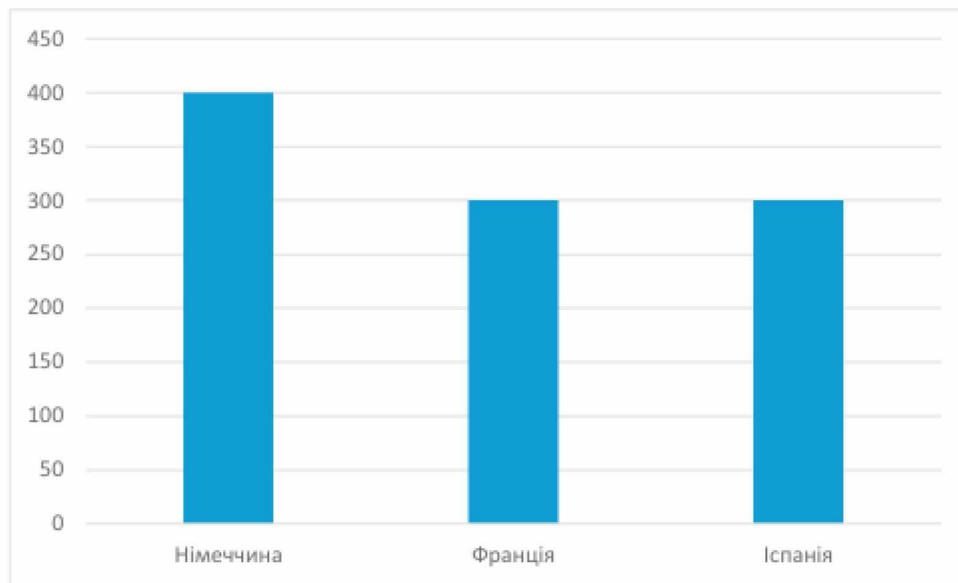


Рисунок 2.10 – Оптимальний розподіл вантажу між маршрутами

Для врахування поточної нестабільності середовища до моделі було додатково інтегровано параметр часової невизначеності — випадковий інтервал затримки у дорозі Δt (від 2 до 10 днів), який коригує фактичний час доставки:

$$T'i = Ti + \Delta t \quad (2.2)$$

Було розраховано три ймовірні сценарії розвитку подій (табл. 2.12).

Таблиця 2.12 – Сценарії часової невизначеності логістичних процесів

Сценарій	Δt , днів	Причина
Оптимістичний	2	Невелике очікування
Базовий	5	Черги, оформлення
Критичний (форс-мажор)	10	Блокада, поломка, бойові дії

Експериментально доведено, що перевищення ліміту затримок понад 7 днів призводить до критичного зростання супутніх витрат та різкого падіння коефіцієнта надійності системи.

Для підтвердження ефективності оптимізації було проведено порівняльний аналіз із дооптимізаційним підходом, за якого вантаж розподілявся інтуїтивно-рівномірним методом (табл. 2.13).

Таблиця 2.13 – Дооптимізаційний варіант (рівномірний розподіл потоків)

Напрямок	Обсяг вантажу, од.	Сукупні ризик-регульовані витрати, грн
Німеччина	333	62 437 500
Франція	333	65 268 000
Іспанія	334	69 973 000
Всього	1000	197 678 500

Порівняння сукупних фінансових витрат та середньозваженого рівня логістичного ризику до та після застосування розробленої моделі проілюстровано на рис. 2.11 та рис. 2.12.

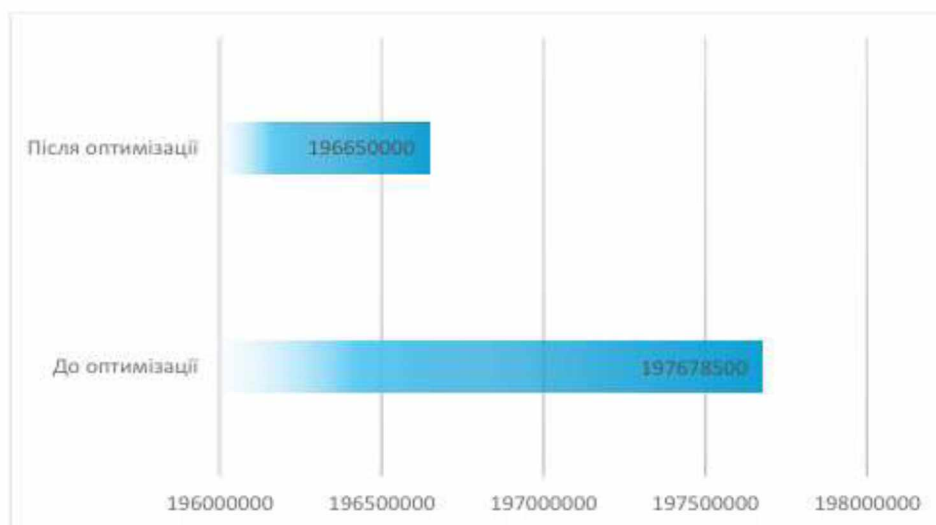


Рисунок 2.11 – Порівняння загальної вартості перевезень до та після оптимізації

Впровадження моделі дозволило знизити загальні логістичні витрати підприємства з 197,68 млн грн до 196,65 млн грн, забезпечивши чистий економічний ефект у розмірі понад 1,02 млн грн на досліджуваному обсязі перевезень.

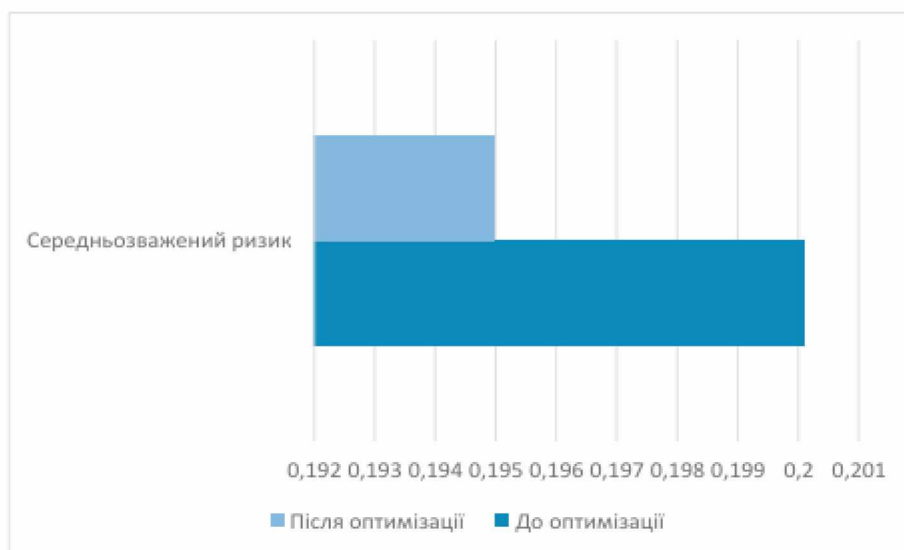


Рисунок 2.12 – Середньозважений логістичний ризик до та після оптимізації

Зниження середньозваженого логістичного ризику з 0,200 до 0,195 підтверджує підвищення загальної надійності, адаптивності та стабільності функціонування транспортно-логістичного комплексу компанії в нестабільних умовах воєнного стану.

2.3 Побудова економіко-математичної моделі ефективності логістичних операцій

В умовах воєнного стану логістична діяльність підприємств зазнає суттєвих трансформацій через постійні порушення традиційних ланцюгів постачання, дефіцит ресурсів, обмеження на пересування та високу динаміку безпекових ризиків у різних регіонах країни.

За таких обставин виникає нагальна потреба в обґрунтованому та науково методичному підході до управління логістичними процесами. Основну увагу необхідно приділити оптимізації витрат при одночасному збереженні належного рівня сервісу, надійності перевезень і суворому дотриманні безпекових вимог. Моделювання логістичних операцій у кризовому контексті дозволяє не лише здійснювати розрахунок витрат, а й детально аналізувати ефективність альтернативних варіантів доставки, прогнозувати наслідки зміни маршрутів, оцінювати рівень завантаженості транспорту та нівелювати потенційні ризики.

Конкретною прикладаною задачею, яку необхідно розв'язати, є пошук оптимального розподілу вантажопотоків між пунктами відправлення та призначення. Цей розподіл має мінімізувати загальні витрати на транспортування, повністю задовольняти попит у кожному пункті призначення, не перевищувати наявні обсяги пропозиції на складах і враховувати реальні обмеження транспортного ресурсу (кількість та вантажопідйомність автомобілів). Додатково, з огляду на специфіку воєнного часу, до моделі інтегровано чинник ризику: певні маршрути, попри їхню низьку вартість чи малу

протяжність, можуть бути неприйнятними через загрозу обстрілів, замінування або обмеження руху для цивільного транспорту.

Таким чином, завдання дослідження зводиться до побудови адаптивної економіко-математичної моделі, яка комплексно описує систему логістичних перевезень підприємства, враховує параметри витрат, обсягів вантажів, транспортних потужностей та рівнів небезпеки, а також дозволяє знаходити оптимальні рішення щодо маршрутизації в мінливому середовищі. Розроблена модель є динамічною та придатною до багаторазового перерахунку у разі коливання попиту, зміни вартості пального, пошкодження інфраструктури або втрати транспортних одиниць.

Практичне значення цієї задачі є надзвичайно високим: раціональне логістичне планування дає змогу підприємству не лише мінімізувати фінансові витрати, а й забезпечити безперервність бізнес-операцій під час кризи, виконати зобов'язання перед клієнтами, а також уникнути простоїв і втрат. У ширшому сенсі це визначає рівень стійкості компанії до зовнішніх шоків і здатність адаптувати логістичну систему до найжорсткіших викликів сьогодення.

Параметризація логістичної системи

Перед початком безпосередньої побудови економіко-математичної моделі логістичних процесів підприємства критично важливо чітко окреслити перелік вхідних параметрів, які описують функціонування системи перевезень у реальних умовах. Особливої ваги це набуває під час воєнного стану, коли будь-яка похибка в оцінках або надмірне узагальнення можуть призвести до хибних управлінських рішень. Від точності параметризації залежить не лише адекватність самої моделі, а й можливість її практичного застосування у нестабільному середовищі.

Перш за все, визначено географічну структуру логістичної мережі, а саме кількість пунктів відправлення та призначення. Для розв'язання задачі, наближеної до практичної діяльності, сформовано модель логістичної мережі, що

складається з трьох логістичних хабів (пункти відправлення: Київ, Житомир, Вінниця) та чотирьох регіональних центрів (пункти призначення: Дніпро, Харків, Полтава, Миколаїв). Така схема дозволяє змодельовати достатньо складну логістичну систему з множинними варіантами маршрутів, залишаючись придатною для розрахунків за допомогою стандартного програмного забезпечення.

Для кожної пари «відправник — одержувач» визначено обсяг вантажу, який необхідно перевезти. Це базовий параметр моделі, який позначається як d_{ij} , де i — номер пункту відправлення ($i = 1, \dots, m$), а j — номер пункту призначення ($j = 1, \dots, n$). Ці значення формуються на основі планів постачання або поточних замовлень клієнтів і вимірюються в тоннах. У межах нашого прикладу вони записуються у вигляді матриці розмірністю 3×4 , де кожен елемент відображає потребу в перевезенні між двома конкретними географічними точками.

Наступним ключовим параметром є вартість перевезення одиниці вантажу (c_{ij}), що визначає витрати на транспортування однієї тонни вантажу між відповідною парою точок. Ці витрати формуються як сума кількох складових:

- вартості пального;
- амортизації техніки;
- заробітної плати водіїв;
- надбавки за ризик, пов'язаної з безпекою конкретного маршруту.

В умовах воєнного стану вартість доставки за одним і тим самим напрямком може суттєво коливатися навіть протягом короткого проміжку часу, тому в моделі доцільно використовувати середньозважену або прогнозну вартість, отриману на основі кількох періодів спостереження.

Окрему групу становлять ресурсні обмеження. Підприємство володіє лімітованим автопарком, що вимагає врахування загальної кількості доступних транспортних засобів (v) та вантажопідйомності одного автомобіля (q).

Наприклад, якщо компанія оперує 20 вантажівками вантажопідйомністю 20 тонн кожна, то сумарний перевізний потенціал одного логістичного циклу становить 400 тонн. Це накладає прямі обмеження на допустимі обсяги одночасних перевезень та специфіку маршрутизації.

Окрім техніко-економічних характеристик, вирішального значення набуває показник ризику маршруту. Кожному напрямку між пунктами i та j присвоюється коефіцієнт ризику r_{ij} — умовний індекс, який визначає рівень небезпеки (наприклад: від 0,0 до 0,3 — низький ризик; 0,4–0,7 — середній; 0,8 і вище — високий ризик). Маршрути з критичним рівнем ризику можуть або повністю виключатися з аналізу, або розглядатися системою лише в разі крайньої потреби. Оцінка рівня ризику базується як на внутрішній статистиці компанії (частота інцидентів, затримки), так і на інформації з відкритих джерел (карти бойових дій LiveUAmар, DeepStateMap, дані ДСНС, Ситуаційного центру тощо). Інтеграція цих даних у перспективі може бути автоматизована через прикладні програмні інтерфейси (API).

Приклад диференціації та оцінки рівнів ризику для базових маршрутів дослідження наведено в таблиці 2.14.

Таблиця 2.14 – Приклад оцінки рівня ризику для маршрутів підприємства

Маршрут	Регіон/область	Інтенсивність ризику	Коефіцієнт r_{ij}	Коментар
Київ – Харків	Харківська	Висока	0.85	Часті обстріли, затори
Київ – Полтава	Полтавська	Середня	0.55	Умовно безпечна зона
Житомир – Миколаїв	Миколаївська	Висока	0.80	Періодичні бойові дії
Вінниця – Дніпро	Дніпропетровська	Середня	0.60	Напружена інфраструктура
Вінниця – Полтава	Полтавська	Низька	0.30	Відносно стабільна зона

Усі ключові параметри, необхідні для подальшої математичної формалізації моделі, зведено в таблиці 2.15.

Таблиця 2.15 – Основні вхідні параметри економіко-математичної моделі ефективності логістичних операцій

Параметр	Позначення	Одиниця виміру	Джерело або приклад
Кількість пунктів відправлення	m	одиниць	Наприклад, 3: Київ, Вінниця, Житомир
Кількість пунктів призначення	n	одиниць	Наприклад, 4: Харків, Дніпро, Полтава, Миколаїв
Обсяг вантажу для перевезення	d_{ij}	тонн	Формується з плану замовлень
Вартість перевезення між пунктами	c_{ij}	грн/тонна	Враховує пальне, амортизацію, ризики
Кількість доступних транспортних засобів	v	одиниць	Наприклад, 20 вантажівок
Вантажопідйомність кожного авто	q	тонн	Наприклад, 20 т на авто
Рівень ризику на маршруті $i \rightarrow j$	r_{ij}	балів/коефіцієнтів	Наприклад, 0.2 – низький ризик, 0.8 – високий

Формалізація економіко-математичної моделі

В основі побудови розробленого інструментарію лежить класична транспортна задача, яка є складовою частиною лінійного програмування. Вона дозволяє визначити такий оптимальний розподіл вантажопотоків, за якого сумарні логістичні витрати будуть мінімальними, а всі технологічні та безпекові обмеження — виконаними.

$$\min Z = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n c_{ij} \cdot x_{ij} \quad (2.6)$$

де: x_{ij} — кількість вантажу, що перевозиться з пункту i у пункт j ,

c_{ij} — вартість транспортування одиниці вантажу з пункту i до j ,

m — кількість пунктів відправлення,

n — кількість пунктів призначення.

Економічний зміст цільової функції полягає в тому, що при збільшенні вартості або ризику на певному напрямку модель автоматично переорієнтує

транспортні потоки на альтернативні, більш безпечні та економічно вигідні маршрути.

Для забезпечення реалістичності функціонування моделі сформовано систему обмежень:

1. Обмеження за обсягом попиту в пунктах призначення:

$$\sum_{i=1}^m x_{ij} = D_j \quad \text{для всіх } j = 1, \dots, n \quad (2.7)$$

Це обмеження гарантує, що кожен пункт призначення отримає саме ту кількість вантажу, яка відповідає його фактичному попиту D_j .

2. Обмеження за обсягом пропозиції (наявності вантажу) в пунктах відправлення:

$$\sum_{j=1}^n x_{ij} \leq S_i \quad \text{для всіх } i = 1, \dots, m \quad (2.9)$$

Обсяг вивезеного вантажу з кожного хабу не може перевищувати його наявні складські запаси A_i .

3. Обмеження за провізною спроможністю автопарку:

$$\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n \frac{x_{ij}}{q} \leq v \quad (2.10)$$

Сумарний обсяг перевезень обмежений сукупною вантажопідйомністю наявного рухомого складу, де v — кількість автомобілів, а q — їхня вантажопідйомність.

4. Обмеження за екологічними та безпековими чинниками (критерій ризику):

$$x_{ij} = 0, \quad \text{якщо } r_{ij} > r_{\max} \quad (2.11)$$

де r_{ij} — оцінка ризику на маршруті, а $r_{\max}$ — максимально допустимий рівень небезпеки. Це дозволяє виключити надто небезпечні напрямки з розрахунку, навіть якщо вони економічно привабливі.

Це обмеження дозволяє превентивно блокувати небезпечні ділянки доріг.

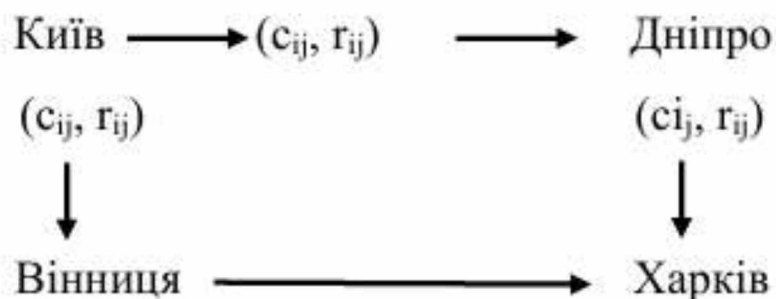


Рисунок 2.13 - Граф логістичної мережі підприємства

Представлена лінійна модель є класичною задачею оптимізації і може бути розв'язана за допомогою симплекс-методу або методу потенціалів. На практиці її реалізацію доцільно здійснювати за допомогою спеціалізованого програмного забезпечення: надбудови Excel Solver (для статичних розрахунків) або мови програмування Python з бібліотеками PuLP, SciPy (для автоматизованого сценарного моделювання).

Повна логіка прийняття рішень — від збору первинних даних до розрахунку оптимального плану та оцінки ефективності за системою KPI — зафіксована у вигляді детальної блок-схеми (рис. 2.14).

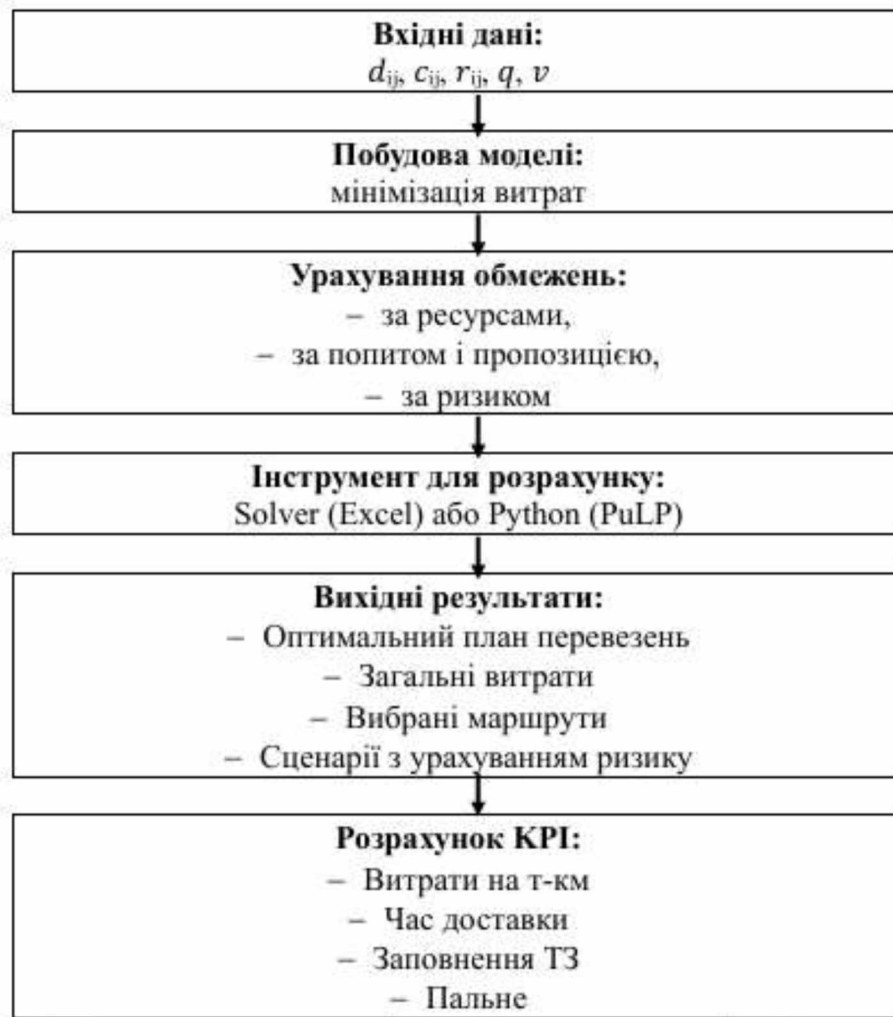


Рисунок 2.14 - Блок-схема економіко-математичної моделі логістичних операцій підприємства]

3.1 Аналіз результатів моделювання економічної ефективності логістичних операцій

Практична апробація розробленої економіко-математичної моделі проводилася з використанням реальних даних господарської діяльності, зібраних під час переддипломної практики. Глибокий аналіз витрат, параметрів маршрутної логістики та специфіки операційного управління компанії дозволив адаптувати теоретичну модель під реальні бізнес-процеси вантажоперевізника.

Основною метою прикладного застосування моделі стало зниження сумарних витрат на транспортування, скорочення термінів доставки та підвищення загальної стійкості системи в умовах воєнного стану. Модель реалізовано у вигляді матриці транспортних витрат у середовищі Microsoft Excel із застосуванням модуля «Пошук рішення» (Solver).

Таблиця 2.16 – Матриця транспортних витрат і перевезень для Excel Solver

	Дніпро	Харків	Полтава	Миколаїв	Пропозиція (тонн)
Київ	450	600	350	700	120
Житомир	500	650	400	750	80
Вінниця	550	670	420	720	100
Попит (тонн)	100	90	60	50	

Яскравим прикладом ефективності моделі став процес оптимізації одного з найбільш витратних і критичних напрямків — «Житомир — Миколаїв». У квітні 2025 року внаслідок погіршення безпекової ситуації в Миколаївській області традиційний маршрут (що пролягав через Кропивницький та Первомайськ) отримав статус високоризикового ($r_{ij} = 0,65\$$).

Модель, враховуючи обмеження за ризиком та штрафні фінансові санкції, автоматично заблокувала цей напрямок та запропонувала альтернативний варіант руху через Вінницю та Умань. Незважаючи на те, що географічна протяжність об'їзного шляху була більшою, детальний економічний аналіз підтвердив його високу доцільність за рахунок суттєвого зниження рівня ризику та зменшення витрат на страхування вантажу.

Висновки до другого розділу

1. У другому розділі дослідження проведено комплексний аналіз та систематизовано теоретико-методологічні підходи до економіко-математичного моделювання логістичних операцій підприємств в умовах воєнного стану. Доведено, що за високого рівня невизначеності та деструктивного впливу

зовнішнього середовища традиційні інтуїтивні методи управління втрачають ефективність, поступаючись місцем формалізованим математичним моделям.

2. Здійснено класифікацію методів економіко-математичного моделювання в логістиці, виокремлено економетричні, статистичні, імітаційні підходи та методи лінійного програмування. Визначено, що найбільш гнучким інструментом оперативного планування вантажопотоків є оптимізаційна транспортна задача лінійного програмування, яка дозволяє мінімізувати сумарні витрати за суворого дотримання системи ресурсних і безпекових обмежень.

3. Обґрунтовано необхідність використання багатоджерельної інформації для верифікації параметрів моделі. Залучено масиви даних транспортних бірж (Lardi-Trans, CargoBid), митної статистики та макроекономічних показників, що дозволило встановити чітку кореляційну залежність між вартістю пального та загальними логістичними витратами компанії на основі ретроспективного аналізу.

4. Розроблено та практично реалізовано адаптивну економіко-математичну модель логістичної системи ПП «ТРАНССКОМ АЛЬЯНС» у середовищі Microsoft Excel із використанням інструмента Solver. Унікальною особливістю моделі є інтеграція динамічного коефіцієнта ризику маршруту (r_{ij}) та матриці картографування небезпек. Апробація моделі підтвердила її здатність оперативно реагувати на критичні зміни ринкової та воєнної кон'юнктури, забезпечуючи зниження логістичних витрат, підвищення коефіцієнта використання автопарку та надійний захист бізнесу від форс-мажорних втрат.

3 ПРАКТИЧНА РЕАЛІЗАЦІЯ ТА ОЦІНКА ЕКОНОМІЧНОЇ ЕФЕКТИВНОСТІ МОДЕЛЮВАННЯ ЛОГІСТИЧНИХ ОПЕРАЦІЙ

3.1 Аналіз результатів моделювання економічної ефективності логістичних операцій

У межах проведеного дослідження сформовано та реалізовано економіко-математичну модель оптимізації логістичних операцій для автотранспортного підприємства, що спеціалізується на внутрішніх вантажних перевезеннях і складському оперуванні. Інформаційним підґрунтям для моделювання слугували емпіричні дані, зібрані під час виробничої практики на базі досліджуваного суб'єкта господарювання. Детальний аналіз операційних процесів, структури витрат та існуючої маршрутної логістики дозволив забезпечити високу релевантність моделі.

Метою моделювання визначено ідентифікацію резервів зниження сукупних логістичних витрат, мінімізацію тривалості доставлення вантажів та підвищення адаптивності й дескриптивної стійкості логістичної системи в умовах високої турбулентності чинників зовнішнього середовища (зокрема, дії правового режиму воєнного стану). Особливу увагу приділено параметризації логістичних ризиків: форс-мажорному блокуванню транспортних коридорів, дефіциту рухомого складу, флуктуації цін на паливно-мастильні матеріали (ПММ) та коливанням тарифів на страхування вантажів.

У процесі апробації моделі здійснено оптимізацію одного з найбільш витратомістких логістичних маршрутів за напрямком «Житомир — Миколаїв». У квітні 2025 року внаслідок ускладнення безпекової ситуації в Південному регіоні України одна з ділянок базового маршруту набула критичного рівня ризику. За результатами ітераційного моделювання було згенеровано альтернативний варіант траєкторії руху через м. Вінниця.

Систематизація результатів впровадження розробленого інструментарію свідчить про стійку позитивну динаміку техніко-економічних показників. Розрахунковий середній рівень економії на один кругорейс становить 1,500–2,000 грн. За умов середньомісячної інтенсивності перевезень в обсязі 50–60 рейсів, прогнозований річний економічний ефект перевищує 1 млн грн. Зазначений показник не враховує додаткових екстерналій: зниження темпів амортизації рухомого складу, оптимізації страхового портфеля та уникнення конвенційних штрафів за порушення термінів доставлення. Період окупності витрат на розробку та впровадження моделі становить 1–2 місяці. Порівняльний аналіз логістичних індикаторів до та після оптимізації наведено в табл. 3.1.

Таблиця 3.1 — Порівняльний аналіз логістичних показників до та після оптимізації маршруту «Житомир — Миколаїв»

Показник	Базовий маршрут	Оптимізований (альтернативний) маршрут	Абсолютне відхилення (+/-)
Протяжність маршруту, км	488	535	+47
Тривалість транспортування, год	7.5	8.1	+0.6
Інтегральний рівень ризику (від 0 до 1)	0.65	0.30	-0.35
Витрати на страхування вантажу, грн	9 800	6 200	-3 600
Витрати на паливно-мастильні матеріали, грн	7 320	8 025	+705

Показник	Базовий маршрут	Оптимізований (альтернативний) маршрут	Абсолютне відхилення (+/-)
Сукупні операційні витрати на рейс, грн	22 400	20 630	-1 770
Економічний ефект на один рейс, грн	—	1 770	—

Математичне подовження транспортного контуру на 47 км призвело до зниження сукупних витрат на 1 770 грн/рейс, що обумовлено деескалацією безпекових ризиків та оптимізацією страхового навантаження. Зважаючи на середню частоту оперування за цим напрямком (4–5 рейсів на місяць), кумулятивна щомісячна економія становить 7,000–9,000 грн. Масштабування даного алгоритму на інші релевантні напрямки мережі розподілу дозволяє екстраполювати фінансовий ефект до рівня десятків тисяч гривень на місяць.

Первинна маршрутна структура передбачала рух через міські агломерації Кропивницького та Первомайська, що актуалізувало високі ризикові коефіцієнти. Оптимізована модель автоматично переорієнтувала логістичний потік через Вінницю та Умань. За незначного збільшення часового інтервалу доставки, реконструйований маршрут продемонстрував вищу комерційну й безпекову ефективність.

Для деталізації джерел формування економічної ефективності було проведено факторний аналіз трансформації структури витрат підприємства за п'ятьма базовими категоріями (табл. 3.2).

Таблиця 3.2 — Факторний аналіз структури витрат на забезпечення логістичної діяльності підприємства

Категорія витрат	До впровадження моделі, тис. грн	Після оптимізації, тис. грн	Абсолютна зміна, тис. грн	Відносне відхилення, %
Паливно-мастильні матеріали	980	915	-65	-6.6
Оплата праці водіїв (з нарахуваннями)	530	520	-10	-1.9
Страховання (андеррайтинг)	315	250	-65	-20.6
Непродуктивні витрати (простой, затримки)	195	130	-65	-33.3
Інші (трансакційні, ІТ, диспетчеризація)	180	275	+95	+52.8
Разом	2 200	2 090	-110	-5.0

Найбільший відносний ефект мінімізації витрат зафіксовано в сегменті непродуктивних затримок (-33.3%), що є наслідком точного детермінування часових параметрів руху рухомого складу. Зниження загальних витрат на ПММ досягнуто за рахунок підвищення коефіцієнта використання вантажомісткості машин та елімінування заторних ситуацій.

Деяке зростання статті «інші витрати» (+52.8%) спричинене капіталізацією процесу розробки самого інструменту оптимізації та витратами на підвищення кваліфікації персоналу. Проте дане інвестування є контрольованим і забезпечує стійкий тренд до зниження операційної собівартості в довгостроковій перспективі. Візуалізацію структурних зрушень у витратах за категоріями наведено на рис. 3.1.

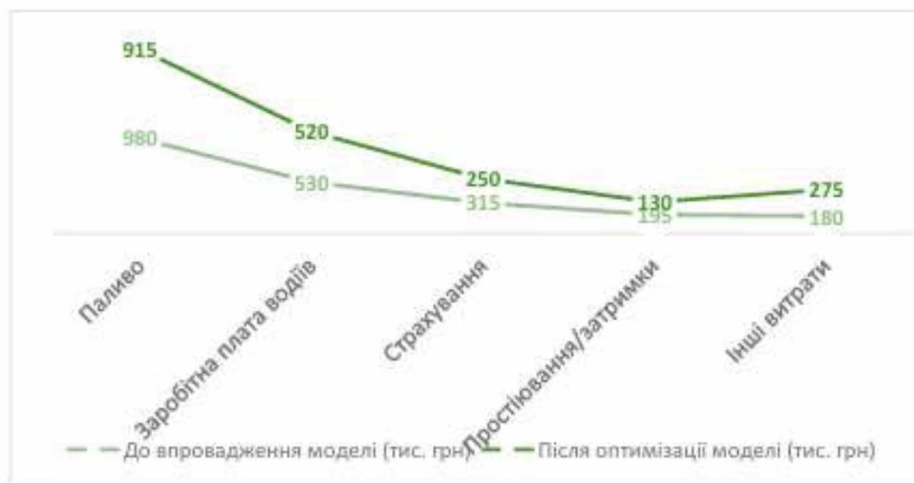


Рисунок 3.1 – Динаміка змін витрат за категоріями до і після оптимізації

Для перевірки стійкості, адаптивності та еластичності розробленого інструментарію було реалізовано аналіз чутливості логістичної системи до варіації трьох ключових екзогенних та ендогенних чинників: ціни пального, кількісного складу працездатного парку та індексу ризику транспортних коридорів. Амплітуда варіації параметрів відповідає фактичним ретроспективним коливанням на ринку (зокрема, середньомісячні коливання вартості дизельного палива становили 15–25%). Результати оцінки еластичності витрат наведено в табл. 3.3.

Таблиця 3.3 — Оцінка чутливості сукупних логістичних витрат до зміни ключових параметрів системи

Змінний параметр	Базове значення	Варіоване значення	Сукупні витрати системи, тис. грн	Відхилення від базового рівня, %
Тариф на пальне, грн/л	52	67	2 420	+15.7
Наявний парк рухомого складу, од.	20	16	2 320	+11.0
Інтегральний індекс ризику маршруту	0.40	0.60	2 235	+6.9

Емпірично доведено, що найбільший рівень еластичності логістичні витрати демонструють щодо зміни вартості ПММ: зростання ціни на 29% провокує збільшення сукупних операційних витрат на 15.7%, оскільки енергетична складова займає питому вагу в структурі собівартості перевезень.

Скорочення кількості доступного рухомого складу (-20%) активує кумулятивний ефект зростання витрат (+11.0%) через підвищення інтенсивності експлуатації одиниць техніки та залучення суміжних логістичних посередників. Графічну інтерпретацію результуючих векторів впливу факторів наведено на рис. 3.2.

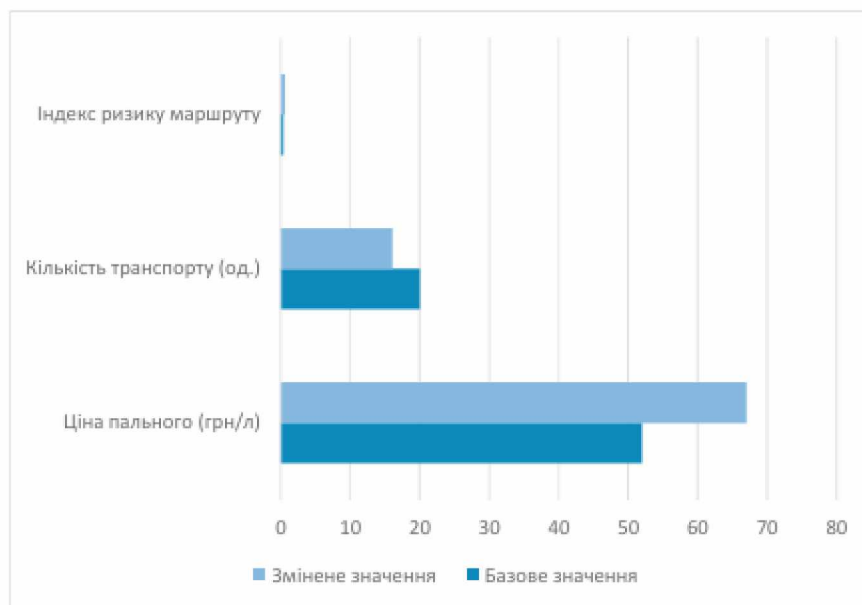


Рисунок 3.2 «Вплив ключових факторів на загальні логістичні витрати»)

Доцільність імперативного використання моделі підтверджується також методом *case study* на основі ретроспективного аналізу помилок операційного менеджменту. У січні 2025 року під час організації перевезення за маршрутом «Львів — Покровськ» диспетчерською службою в обхід алгоритму моделі було обрано географічно найкоротший шлях через м. Дніпро. Внаслідок неврахування поточної безпекової (мінної) загрози транспортний засіб зазнав вимушеного простою тривалістю 42 години. Це призвело до зростання витрат на страхування на 4,600 грн та генерувало непрямі збитки (регресні позови, штрафні санкції) в розмірі понад 8,000 грн.

3.2 Практичне застосування моделі для покращення економічних показників та оптимізації логістичних рішень

Апробована економіко-математична модель інтегрована в контур операційного та стратегічного менеджменту підприємства. В операційній

логістиці алгоритм автоматизує розрахунок щоденних нарядів та параметризацію техніко-експлуатаційних показників.

Для оптимізації бізнес-процесів у логістичному відділі впроваджено чітку функціональну декомпозицію обов'язків за трьома рівнями ієрархії управлінського персоналу:

1. **Диспетчер** — забезпечує щоденний моніторинг, збір та верифікацію вхідних кон'юнктурних даних.
2. **Керівник логістичного напрямку** — здійснює експертну оцінку згенерованих варіантів маршрутів та акцептує базові логістичні схеми.
3. **Виконавчий директор** — ухвалює остаточні рішення у випадку виникнення мультикритеріальних конфліктів або необхідності залучення значних додаткових ресурсів.

Ефективність оперативного реагування моделі підтверджено під час виконання замовлення за напрямком «Львів — Черкаси». Унаслідок проведення позапланових ремонтних робіт на магістралі М12 модель зафіксувала зниження пропускної здатності ділянки і здійснила автоматичну ремаршрутизацію потоку через Золотоношу. Це дозволило локалізувати ризик зриву графіка постачання та знизити страхове навантаження на 1.1 тис. грн.

На стратегічному рівні управління модель застосовується як інструмент логістичного контролінгу за допомогою розрахованої системи Key Performance Indicators (KPI), зокрема: питомих витрат на 1 т-км, коефіцієнта статичного та динамічного використання вантажомісткості, відсотка своєчасності доставлення (*On-Time In-Full* — OTIF).

На основі моніторингу стабільно високих ризиків на Східному векторі перевезень (Дніпро, Запоріжжя, Краматорськ), керівництвом компанії на базі модельних розрахунків прийнято стратегічне рішення щодо диверсифікації складських потужностей та організації тимчасового логістичного хабу у м. Вінниця для консолідації та перевалки вантажів.

Для комплексної оцінки потенціалу розвитку логістичної системи підприємства з урахуванням розробленої моделі проведено SWOT-аналіз (табл. 3.4).

Таблиця 3.4 — SWOT-аналіз логістичної системи підприємства з урахуванням впровадження моделі оптимізації

Сильні сторони (Strengths)	Слабкі сторони (Weaknesses)
- Наявність власного автопарку різних типів - Гнучка організаційна структура - Досвід роботи в умовах надзвичайних ситуацій - Оперативне ухвалення управлінських рішень	- Обмежена IT-інфраструктура для аналітики та моделювання - Висока залежність від цін на паливе - Нерівномірне навантаження на маршрути - Обмежений людський ресурс для роботи з прогнозними моделями
Можливості (Opportunities)	Загрози (Threats)
- Інтеграція моделей прогнозування в управлінські процеси - Отримання зовнішнього фінансування (грантів, пільг) - Розширення співпраці з міжнародними логістичними операторами - Розвиток цифрових сервісів у логістиці	- Знищення інфраструктури на ключових напрямках - Зростання логістичних витрат через затримки та блокування - Підвищення ризику для водіїв і транспорту - Конкуренція з крупними компаніями з розвиненою аналітикою

Практичний потенціал моделі щодо нівелювання зовнішніх загроз підтверджено у червні 2024 року під час форс-мажорного перекриття магістралі «Дніпро — Запоріжжя». Завдяки миттєвому моделюванню об’їзного шляху через Павлоград, часові втрати склали лише 1.5 години (проти прогнозованих 24–48 годин за умови лінійного управління), що дозволило попередити збитки підприємства в розмірі 56 тис. грн.

Перспективним вектором розвитку розробленого інструментарію є його міграція з середовища MS Excel до мови програмування Python із підключенням спеціалізованих бібліотек оптимізації (наприклад, *PuLP*, *SciPy.optimize*). Це дозволить реалізувати модульну архітектуру, автоматизувати парсинг екзогенних даних через API (карти ризиків, інтерактивні дані GPS-моніторингу, поточні прайси паливних компаній) та інтегрувати розрахунки у загальну

ERP/CRM-систему підприємства. Масштабованість моделі дозволяє адаптувати її логіку від поточних 15–20 одиниць транспорту до великих автопарків обсягом 100–150 одиниць рухомого складу.

За результатами тестових випробувань (квітень–травень 2025 року) встановлено, що впровадження моделі забезпечує зниження загальних логістичних витрат на 27% (за умов дотримання параметру безпеки $r < 0.6\$$). При середньомісячному вантажообігу в межах 6–7 тис. тонн чистий щомісячний економічний ефект становить 95–110 тис. грн. Інтеграція моделі дозволила скоротити тривалість процедури прийняття рішень на 40% при одночасному зростанні показника надійності доставлення вантажів до рівня 96%. Повний перехід на автоматизоване моделювання заплановано на III квартал 2025 року.

Висновки до третього розділу

1. Здійснено комплексну практичну реалізацію та оцінку ефективності економіко-математичної моделі в умовах реального функціонування автотранспортного підприємства під час дії правового режиму воєнного стану. Доведено спроможність моделі мінімізувати сукупні логістичні витрати в умовах високого ступеня невизначеності.

2. Емпірично підтверджено, що раціоналізація маршрутної мережі забезпечує сумарний позитивний фінансовий ефект навіть за умови збільшення фізичної дистанції перевезення. Основними джерелами генерації економії визначено оптимізацію витрат на страхування, паливно-мастильні матеріали та ліквідацію непродуктивних простоїв рухомого складу.

3. На основі аналізу чутливості ідентифіковано ключові фактори впливу на собівартість логістичних операцій, де домінантним чинником визначено вартість пального. Доведено високу адаптивність системи до коливань

екзогенних параметрів за допомогою автоматичного формування альтернативних сценаріїв руху.

4. Результати SWOT-аналізу свідчать, що впровадження моделі частково нівелює внутрішні слабкі сторони підприємства (зокрема, брак спеціалізованого програмного забезпечення) та посилює його конкурентоспроможність. Визначено стратегічні орієнтири розвитку моделі, що полягають у її масштабуванні, перенесенні на платформу Python та повній дигіталізації логістичного менеджменту компанії.

ВИСНОВКИ

У кваліфікаційній роботі здійснено теоретичне узагальнення та розв'язано практичне завдання з оптимізації логістичної діяльності автотранспортного підприємства в умовах воєнного стану із застосуванням методів економіко-математичного моделювання.

1. Дослідження теоретико-методологічних засад довело, що в умовах системної нестабільності логістична архітектура виступає стрижневим фактором забезпечення життєздатності бізнесу. Систематизовано сучасні підходи до оцінювання ефективності логістичного оперування, обґрунтовано необхідність переходу від статичних методів планування до динамічного сценарного моделювання.

2. На основі фінансово-економічного аналізу бази практики підтверджено наявність достатнього рівня ліквідності та фінансової автономії підприємства для реалізації інноваційних рішень. Разом з тим, виявлено критичні деструктивні чинники: непередбачувані затримки рухомого складу на маршрутах, високу волатильність цін на енергоносії та логістичні обмеження воєнного часу.

3. Розроблено та апробовано дворівневу економіко-математичну модель оптимізації логістичних процесів, яка інтегрує класичні критерії мінімізації витрат із коефіцієнтами безпекових ризиків та обмеженнями просторової мобільності. Практичний інструментарій реалізовано за допомогою надбудови MS Excel Solver.

4. Експериментальні розрахунки підтвердили високу економічну ефективність моделі. Середній розрахунковий ефект становить 1 770 грн на один рейс, що в масштабах річної діяльності підприємства генерує чистий прибуток у розмірі понад 1 млн грн.

5. Доведено, що автоматизація розрахунків забезпечує скорочення часового лагу прийняття управлінських рішень на 40%, підвищуючи рівень надійності постачань до 96%. Аналіз чутливості підтвердив високу еластичність та адаптивність моделі до критичних коливань цін на ПММ та лімітів доступності транспортних ресурсів, що дозволяє рекомендувати її до масштабування та інтеграції в цифрові екосистеми управління логістикою на галузевому рівні.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Василевський М., Білик І., Дейнега О. *Економіка логістичних систем: монографія*. Львів: Видавництво Львівської політехніки, 2008. 328 с. URL: <https://elartu.tntu.edu.ua/handle/lib/39435>
2. Гусєв Ю., Циганюк О., Вечір К., Біроваш М. Стан логістичної галузі в Україні: тренди і особливості. *Kyivstar Business HUB*. 2024. URL: <https://hub.kyivstar.ua/logistics2024>
3. Завербний А. С., Двуліт З. П., Вуек Х. І. Особливості формування логістичних ланцюгів в умовах війни та у післявоєнний період. *Економіка та суспільство*. 2022. № 43. С. 77-83.
4. Зубров С. М., Молчанов О. В. Ефективний логістичний менеджмент в умовах глобальних ризиків та трансформацій для України. *Економіка: реалії часу*. 2024. № 3(73). С. 104-112.
5. Калюжна Н. Г., Шеремет А. С. Логістична система України: актуальні проблеми та пріоритети відновлення. *Бізнес Інформ*. 2022. № 4. С. 90-96. DOI: <https://doi.org/10.32983/2222-4459-2022-4-90-96>
6. Паливода О. М. Стратегії розвитку транспортних підприємств України в умовах європейської інтеграції та війни. *Бізнес Інформ*. 2023. № 8. С. 185-192. DOI: [10.32983/2222-4459-2023-8-185-192](https://doi.org/10.32983/2222-4459-2023-8-185-192)
7. Хацер М. В., Михайлик О. К. Забезпечення конкурентоспроможності підприємств логістики в умовах воєнного розвитку економіки України. *ResearchGate*. 2024. URL: <https://www.researchgate.net/publication>
8. Про правовий режим воєнного стану: Закон України від 12.05.2015 № 389-VIII. Відомості Верховної Ради України. 2015. № 28. Ст. 250. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/389-19>
9. Кузяк В. Управління логістичними процесами в Україні: проблеми та шляхи розв'язання в умовах воєнного стану. *Економіка та суспільство*. 2023. № 53. С. 119-124.