



DOI: [10.58423/2786-6742/2025-11-164-178](https://doi.org/10.58423/2786-6742/2025-11-164-178)

УДК 658.7:519.8:330.4

### Андрій ПАПІНКО

PhD, викладач кафедри транспорту і логістики  
Західноукраїнський національний університет,  
м. Тернопіль, Україна

ORCID ID: [0000-0001-8515-9376](https://orcid.org/0000-0001-8515-9376)

Scopus Author ID: [57289744100](https://orcid.org/57289744100)

e-mail: [andriypapinko@gmail.com](mailto:andriypapinko@gmail.com)

(Corresponding author)

### Валерій КУДІНОВ

аспірант кафедри транспорту і логістики  
Західноукраїнський національний університет,  
м. Тернопіль, Україна

ORCID ID: [0009-0006-8376-8489](https://orcid.org/0009-0006-8376-8489)

### Віктор КОЛОДІЙ

аспірант кафедри транспорту і логістики  
Західноукраїнський національний університет,  
м. Тернопіль, Україна

ORCID ID: [0009-0001-2023-9217](https://orcid.org/0009-0001-2023-9217)

## ЕКОНОМІЧНА ЕФЕКТИВНІСТЬ СТРАТЕГІЙ ОПТИМІЗАЦІЇ ЛОГІСТИЧНИХ ПРОЦЕСІВ

**Анотація.** Невід'ємною та стратегічно важливою складовою сучасної економіки є ефективне функціонування логістичних систем, адже саме вони забезпечують безперервність постачань, раціональне використання ресурсів і конкурентоспроможність підприємств на глобальному ринку. В умовах нестабільності та зростання невизначеності, спричиненої глобальними кризами, традиційні підходи до оптимізації логістики втрачають свою дієвість, оскільки недостатньо враховують ризики та економічні наслідки управлінських рішень. Це зумовлює потребу у пошуку нових підходів, які поєднують економічні моделі з сучасними методами аналізу даних, імітаційним моделюванням та інструментами нечіткої логіки. Метою дослідження є обґрунтування економічної ефективності стратегій оптимізації логістичних процесів із застосуванням багатокритеріального аналізу, імітаційного моделювання та інструментів нечіткої логіки, а також формування практичних рекомендацій для підвищення стійкості та конкурентоспроможності бізнесу. У роботі описано теоретико-методологічні підходи до оцінки ефективності логістичних систем, визначено критерії економічної ефективності (витрати, час, якість сервісу, ризики) та розглянуто роль цифровізації й інновацій у трансформації логістичних стратегій.

Аналітичні результати показали, що традиційні стратегії орієнтовані на короткострокове скорочення витрат, але мають обмежений вплив на якість сервісу та



This is an Open Access article distributed under the terms of the [Creative Commons CC BY-NC 4.0](https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/)



екологічні показники. Інноваційні підходи, засновані на цифрових технологіях, забезпечують суттєве підвищення рівня обслуговування та екологічної стійкості, але вимагають більших інвестицій. Комбіновані стратегії, що поєднують адаптивність і сталість, продемонстрували найвищий інтегральний ефект, оскільки дозволяють досягти балансу між витратами, сервісом та екологічними параметрами. Практичні імплікації стосуються як бізнесу (оптимізація складів, транспортних потоків, управління запасами), так і державної політики (стимулювання цифрових платформ, підтримка інфраструктурних інвестицій), а також науки (подальша інтеграція економічних моделей із системами штучного інтелекту). Таким чином, результати дослідження підтверджують доцільність використання імітаційного моделювання та нечіткої логіки для оцінки економічної ефективності логістичних стратегій, а також демонструють перспективи розробки комплексних багатокритеріальних моделей, здатних забезпечити підприємствам довгострокову конкурентоспроможність.

**Ключові слова:** логістичні системи, економічна ефективність, оптимізація, імітаційне моделювання, нечітка логіка, стратегії розвитку.

**JEL Classification:** C63, M11, L91, O33

**Absztrakt.** A modern gazdaság elválaszthatatlan és stratégiaiilag fontos eleme a logisztikai rendszerek hatékony működése, mivel ezek biztosítják a szállítások folytonosságát, az erőforrások egyszerű felhasználását és a vállalkozások versenyképességét a globális piacon. A globális válságok okozta instabilitás és növekvő bizonytalanság körülményei között a logisztika optimalizálásának hagyományos megközelítései elveszítik hatékonyságukat, mivel nem veszik kellőképpen figyelembe a kockázatokat és a vezetői döntések gazdasági következményeit. Ez szükségessé teszi új megközelítések keresését, amelyek ötvözik a gazdasági modelleket a modern adatelemzési módszerekkel, az imitációs modellezéssel és a fuzzy logika eszközeivel. A kutatás célja a logisztikai folyamatok optimalizálási stratégiáinak gazdasági hatékonyságának alátámasztása többkritériumos elemzés, szimulációs modellezés és fuzzy logikai eszközök alkalmazásával, valamint gyakorlati ajánlások kidolgozása a vállalkozások fenntarthatóságának és versenyképességének növelése érdekében. A munka a logisztikai rendszerek hatékonyságának értékelésére vonatkozó elméleti és módszertani megközelítéseket ismerteti, meghatározza a gazdasági hatékonyság kritériumait (költségek, idő, szolgáltatás minősége, kockázatok), és megvizsgálja a digitalizálás és az innováció szerepét a logisztikai stratégiák átalakításában.

Az elemzési eredmények azt mutatták, hogy a hagyományos stratégiák a rövid távú költségcsökkentésre irányulnak, de korlátozott hatással vannak a szolgáltatás minőségére és a környezeti mutatókra. A digitális technológiákon alapuló innovatív megközelítések jelentősen javítják a szolgáltatás színvonalát és a környezeti fenntarthatóságot, de nagyobb beruházásokat igényelnek. A kombinált stratégiák, amelyek ötvözik az alkalmazkodóképességet és a fenntarthatóságot, a legnagyobb integrált hatást mutatták, mivel lehetővé teszik a költségek, a szolgáltatás és a környezeti paraméterek közötti egyensúly elérését. A gyakorlati implikációk mind az üzleti életre (raktárak, szállítási áramlások, készletgazdálkodás optimalizálása), mind az állami politikára (digitális platformok ösztönzése, infrastrukturális beruházások támogatása), mind a tudományra (gazdasági modellek további integrálása mesterséges intelligencia rendszerekkel) vonatkoznak. Így a kutatás eredményei megerősítik a szimulációs modellezés és a fuzzy logika alkalmazásának célszerűségét a logisztikai stratégiák gazdasági hatékonyságának értékelésében, valamint bemutatják a komplex, többkritériumos modellek kidolgozásának perspektíváit, amelyek hosszú távú versenyképességet biztosíthatnak a vállalkozások számára.

**Kulcsszavak:** logisztikai rendszerek, gazdasági hatékonyság, optimalizálás, imitációs modellezés, fuzzy logika, fejlesztési stratégiák.

**Abstract.** An integral and strategically important component of the modern economy is the efficient functioning of logistics systems, as they ensure the continuity of supply, rational use of resources, and the competitiveness of enterprises in the global market. In the context of instability and growing uncertainty caused by global crises, traditional approaches to logistics optimization are losing their effectiveness since they do not sufficiently account for risks and the economic consequences of managerial decisions. This determines the need to develop new approaches that combine economic models with modern data analysis methods, simulation modelling, and fuzzy logic tools. The purpose of the study is to substantiate the economic efficiency of logistics process optimization strategies using multi-criteria analysis, simulation modelling, and fuzzy logic, as well as to formulate practical recommendations aimed at enhancing business resilience and competitiveness. The paper describes theoretical and methodological approaches to evaluating the efficiency of logistics systems, identifies the key criteria of economic efficiency (costs, time, service quality, risks), and considers the role of digitalization and innovation in the transformation of logistics strategies.

Analytical results have shown that traditional strategies are primarily aimed at short-term cost reduction but have a limited impact on service quality and environmental indicators. Innovative approaches based on digital technologies provide a significant improvement in service levels and environmental sustainability but require larger investments. Combined strategies, which integrate adaptability and sustainability, demonstrated the highest overall effect, as they allow achieving a balance between costs, service, and ecological parameters. Practical implications concern business (warehouse optimization, transport flows, inventory management), public policy (support for digital platforms, infrastructure investments), and science (further integration of economic models with artificial intelligence systems). Thus, the study confirms the feasibility of applying simulation modelling and fuzzy logic to evaluate the economic efficiency of logistics strategies and highlights the prospects for developing comprehensive multi-criteria models capable of ensuring the long-term competitiveness of enterprises.

**Keywords:** logistics systems, economic efficiency, optimization, simulation modelling, fuzzy logic, development strategies.

**Постановка проблеми.** В умовах глобальної конкуренції та зростаючої економічної нестабільності оптимізація логістичних процесів набуває особливого значення, адже сучасні економічні агенти функціонують у середовищі, де ключовими чинниками є швидкість реагування на зміни, ефективне управління ресурсами та мінімізація витрат при збереженні високої якості. У цих умовах логістика стала не лише допоміжним інструментом, а стратегічним фактором досягнення конкурентоспроможності бізнесу та сталого економічного розвитку.

Разом з тим, традиційні методи оптимізації логістичних систем здебільшого вибудовані на припущенні про стабільність ринку та передбачуваність економічних умов, що є недостатнім та ігнорує ключові чинники невизначеності: коливання цін на ресурси, перебої у постачанні, транспортні ризики, геополітичні виклики та інші непередбачувані події. Недооцінка цих чинників призводить до неповної оцінки економічних наслідків обраних стратегій оптимізації, що, у свою чергу, знижує ефективність управлінських рішень і може генерувати додаткові витрати замість очікуваної економії. Таким чином, актуальною проблемою є пошук таких стратегій оптимізації логістичних процесів, які враховують невизначеність, дозволяють формувати сценарні моделі розвитку та забезпечують комплексну економічну оцінку їх ефективності.



**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** У сучасній науковій літературі проблематика оптимізації логістичних систем та оцінки їх економічної ефективності є однією з ключових у сфері управління ланцюгами постачання. Значна кількість досліджень присвячена застосуванню методів моделювання та цифрових технологій для підвищення стійкості та результативності логістичних процесів.

Так, Бадахшан Е., Мустафі Н., Бахадорі Р. та ін. [1] здійснили комплексний огляд використання симуляційних та машинних методів у логістиці, акцентуючи увагу на синергетичному ефекті поєднання моделювання з інструментами штучного інтелекту. Подібну тенденцію підтверджують роботи Боттані Е., Каселла Дж. [2], які аналізують розвиток дискретно-подієвого моделювання в управлінні логістикою, що дає змогу отримувати більш точні економічні оцінки оптимізаційних стратегій.

Окремим напрямом досліджень є питання стійкості логістичних систем у кризових умовах. Кордер Б., Маю Ж., Конле М. [3] показують, що симуляційні методи у поєднанні з цифровими стратегіями допомагають підприємствам адаптуватися до перебоїв у постачаннях. У роботі Хоссейні Шекарабі С., Кіані Маві Р., Ромеро Макау Ф. [4] наголошується на ролі стійких ланцюгів постачання як ключового чинника економічної стабільності.

Значна увага приділяється також питанням нечіткої логіки та мультиоб'єктивної оптимізації. Карабачак Е., Кутлу Х. А. [5] запропонували застосування нечіткої логіки для оцінки ефективності логістичних центрів, що дозволяє враховувати невизначеність ринкового середовища. У свою чергу, Дунвей Се, Юнчже Цю, Цзінси Хуан [6] розробили модель багатокритеріальної оптимізації логістики, де поряд з економічними показниками враховуються екологічні аспекти.

Практичний вимір економічної ефективності розкривають Шиффманн О., Хікс Б., Нассегі А., Гопсілл Дж., Валеро М. [7], які здійснили імітаційне моделювання «вартість–вигода» у холодних ланцюгах постачання, що показує значний потенціал цифровізації у зниженні витрат. Подібні підходи знаходять відображення і в дослідженнях Бесерра П., Мула Х., Санчіс Р. [8], де розглядається оптимізація розташування, транспортування та запасів із позицій сталого розвитку.

Варто також відзначити роботи у сфері спеціалізованого моделювання. Лі Ф., Тао Цз., Ван Ц. та ін. [9] зробили ґрунтовний огляд методів моделювання холодних ланцюгів логістики з акцентом на зниження викидів вуглецю, а Цай Х., Сюй П., Тан С., Лінь Г. [10] застосували алгоритми глибинного навчання для задач маршрутизації, що свідчить про міждисциплінарний розвиток напрямку.

Отже, проведений аналіз підтверджує, що наукові дослідження активно поєднують методи імітаційного моделювання, нечіткої логіки та цифрових технологій для вирішення задач оптимізації логістики. Водночас залишається недостатньо розробленим саме економічний аспект цих стратегій в частині

оцінки їх практичної ефективності та фінансових імплікацій для підприємств, що і визначає актуальність обраної теми.

**Виділення невирішених раніше частин загальної проблеми.** Попри значний науковий доробок у сфері оптимізації логістичних процесів, низка важливих аспектів залишається недостатньо опрацьованою. Більшість наявних досліджень зосереджені на технічних аспектах оптимізації логістики, тоді як економічна оцінка ефективності стратегій часто залишається другорядною. Недостатньо враховано вплив невизначеності та ризиків, що формуються під впливом глобальних криз і нестабільності ринку. Бракує комплексних моделей, які поєднують оптимізацію, імітаційне моделювання та економічний аналіз практичних наслідків для бізнесу.

Таким чином, невирішеною залишається проблема створення багатовимірних моделей, які одночасно враховують економічну результативність, ризики та адаптивність логістичних систем. Це визначає потребу у подальших дослідженнях, спрямованих на розробку методологічних підходів до економічного оцінювання стратегій оптимізації на основі імітаційного моделювання та інструментів нечіткої логіки.

**Формулювання цілей статті (постановка завдання).** Метою дослідження є обґрунтування економічної ефективності стратегій оптимізації логістичних процесів із використанням імітаційного моделювання та інструментів нечіткої логіки, а також розробка практичних рекомендацій щодо підвищення конкурентоспроможності підприємств в умовах невизначеності.

**Виклад основного матеріалу дослідження.** Ефективність логістичної системи доцільно розглядати як багатовимірну категорію, що поєднує витратну, часову, сервісну та ризикову компоненти. У літературі домінують дві групи підходів: аналітично-оптимізаційні моделі (лінійне/цілочислове та багатокритеріальне програмування) та імітаційні підходи (моделювання, системна динаміка, агент-орієнтовані моделі), часто в синергії з методами ШІ для складних, стохастичних середовищ. Роль імітації та гібридів «simulation + ML» суттєво зросла, оскільки вони краще репрезентують операційні обмеження й поведінкову невизначеність у ланцюгах постачання [1, 2].

Базовою множиною критеріїв є логістичні витрати (транспорт, складування, запаси, дефіцит/надлишок), часові показники (час виконання замовлення, простої, надійність термінів), якість сервісу (рівень обслуговування, виконання SLA) та ризик (ймовірність збоїв, вразливість до форс-мажору). Сучасні дослідження рекомендують мультиоб'єктивний підхід із врахуванням компромісів «витрати-сервіс», коли економічні та екологічні цілі оптимізуються одночасно (наприклад, мінімізація витрат і викидів). Це дає керовані «криві Парето» для прийняття управлінських рішень [6].

Аналітичні моделі забезпечують прозорість компромісів і придатні для стратегічних порівнянь, однак ускладнюються при реалістичних стохастичних припущеннях. Імітаційні підходи відтворюють операційні деталі, черги, ресурси й «вузькі місця», що покращує економічну інтерпретацію результатів



(наприклад, як змінюються витрати при зміні політики поповнення або графіків транспорту). Нечітка логіка доповнює ці методи в умовах нечітких даних (якість сервісу, «гнучкі» KPI), дозволяючи коректно агрегувати експертні судження у метрики ефективності (наприклад, оцінка ефективності логістичних центрів із нечіткою DEA) [2].

Для вирішення поставлених завдань пропонуємо застосовувати схему поєднання дискретно-подієвої імітацію (Discrete-Event Simulation, DES) для детального відтворення процесів складування, комплектування, завантаження/розвантаження та транспортування та метод Монте-Карло для сценарного прогону параметрів попиту, часу доставки, ставок фрахту, рівнів відмов. Для задач оперативного планування (маршрути, проміжки часу) імітацію можна інтегрувати з евристичними / метаевристичними, для стратегічного – з економетричними чи LP/MIP-модулями для вибору конфігурацій мережі. Для параметрів, які складно виміряти точно (коливання попиту, надійність постачальника, якість сервісу, ризик перебоїв), застосовується нечітка логіка: лінгвістичні змінні («високий попит», «низька надійність», «середній ризик»), функції належності (трикутні/трапецієподібні), правила виводу Мамдані/Сугено. Це дозволяє консолідувати експертні судження у нечіткі показники ефективності, а далі дефазифікувати їх для включення у багатокритеріальну цільову функцію чи ранжування альтернатив. Приклад валідованого застосування – оцінювання ефективності логістичних центрів через нечітку DEA.

За результатами формування сценаріїв оптимізації виділяємо три базові стратегії: традиційна (cost-cutting); інноваційна; комбінована (табл.1).

**Таблиця 1**

**Базові стратегії оптимізації логістичних процесів**

| Стратегія                             | Опис                                                                                                                                                              | Очікуваний ефект                                                     |
|---------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------|
| Традиційна (cost-cutting)             | раціоналізація складування, укрупнення партій, маршрути з фіксованими вікнами, зниження оборотних запасів                                                         | швидка економія витрат, можливий ризик втрати гнучкості              |
| Інноваційна                           | застосування датчиків/ІoT, аналітики попиту, алгоритмів маршрутизації (у т.ч. «зелені» VRP з гнучкими вікнами), інтеграція імітації з ML для адаптивних політик   | зниження витрат і вуглецевого сліду при зростанні надійності сервісу |
| Комбінована (адаптивність і сталість) | включає інвестиції у резервні потужності/постачальників, перерозподіл запасів та «зелений» транспорт із оптимізацією на множині цілей (витрати, сервіс, екологія) | баланс між економією та стійкістю до збоїв                           |

*\*Сформовано на основі [1]*

Традиційна стратегія cost-cutting показує негайний ефект на прямі витрати (–X% TCO) за рахунок укрупнення партій і скорочення складських операцій;

однак чутливий до стохастичних збурень (сплески попиту, затримки на «останній милі»).

Інноваційна або стратегія цифровізації має вищі CAPEX/OPEX на етапі впровадження, але за результатами імітаційних експериментів дає кращі показники cost-to-serve ( $-Y\%$ ) і стабілізує SLA при волатильності попиту. Публікації демонструють, що поєднання імітації з ML покращує якість рішень за рахунок онлайн-адаптації політик [1].

Комбінована стратегія посилює економічну стійкість, адже передбачає, що незначні втрати в короткостроковій економії компенсуються кращими результатами в сценаріях з перебоями (менші штрафи за невиконання, нижчі витрати дефіциту, менший «bullwhip»). Дослідження з акцентом на resilience підтверджують економічний сенс інвестицій у резерви/гнучкість під час шоків [11].

Результати порівняння стратегій за ключовими параметрами ефективності ілюструють, що традиційна стратегія демонструє найбільший ефект у скороченні витрат, проте поступається інноваційній та комбінованій за показниками сервісу та сталості. Інноваційна стратегія забезпечує кращий баланс між економією та якістю обслуговування, тоді як комбінована стратегія демонструє найбільш стійкий результат за умов невизначеності. Таким чином, можна стверджувати про компроміс між витратами, сервісом та екологічним ефектом та короткостроковою ефективністю є традиційної стратегії, проте за рахунок цифрових технологій інноваційна й комбінована стратегії забезпечують більш рівномірний розподіл вигаду між економічними та екологічними критеріями.

На рисунку 1 відображено динаміку чистого економічного ефекту трьох стратегій оптимізації логістичних процесів у часовому розрізі. Графік наочно демонструє різницю між короткостроковим та довгостроковим впливом кожної з них. Традиційна стратегія cost-cutting характеризується найбільш стрімким зростанням у початковий період, що пояснюється швидким впровадженням простих інструментів раціоналізації – укрупнення партій, жорсткими графіками маршрутизації та скороченням оборотних запасів. Саме завдяки низьким інвестиційним витратам та негайному впливу на прямі витрати ця стратегія демонструє виражений початковий ефект на показник ТСО. Однак динаміка кривої свідчить, що ефект традиційної стратегії поступово вирівнюється й виходить на плато: подальше зниження витрат обмежене, а ризики втрати гнучкості й накопичення прихованих витрат (пов'язаних із дефіцитом або порушеннями SLA) починають компенсувати початкову вигоду. Це означає, що короткострокова перевага не трансформується у стабільний довгостроковий ефект.

Натомість інноваційна стратегія цифровізації, хоч і стартує з нижчих показників через високі початкові CAPEX та додаткові операційні витрати, у подальшій динаміці демонструє стале зростання економічного ефекту. Впровадження аналітики попиту, IoT-сенсорів та алгоритмічної маршрутизації дозволяє оптимізувати процеси в режимі реального часу, що підвищує

ефективність обслуговування та знижує сукупні витрати на замовлення. У результаті крива інноваційної стратегії перетинає криву традиційної та формує вищий інтегральний результат.

Комбінована стратегія, яка поєднує елементи економії та інвестиції у стійкість, демонструє ще цікавішу траєкторію. Її економічний ефект у перші періоди зростає повільніше, оскільки значні ресурси спрямовуються на формування резервних потужностей, диверсифікацію постачальників та інтеграцію «зелених» транспортних рішень. Проте з часом ця стратегія забезпечує стабільність у сценаріях із перебоями та стохастичними збуреннями: у моделі це відображається плавним і більш сталим зростанням чистого економічного ефекту, який у довгостроковій перспективі перевищує результати традиційної стратегії та наближається до інноваційної.



**Рис. 1. Порівняння чистого економічного ефекту стратегій**

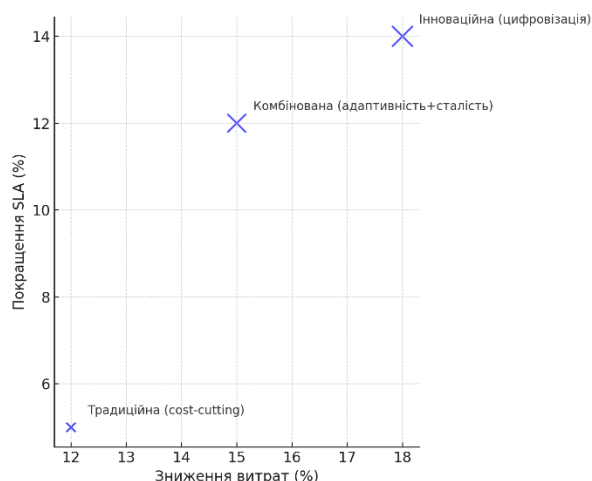
*\*Сформовано авторами за результатами досліджень.*

Загалом, рисунок 1 підтверджує тезу про необхідність стратегічного горизонту в оцінці логістичних рішень. Якщо компанія орієнтована лише на короткострокові результати, вона може віддати перевагу традиційним заходам cost-cutting. Однак для забезпечення стійкості та інтегральної ефективності у середньо- та довгостроковій перспективі більш доцільним виявляється перехід до інноваційних або комбінованих стратегій.

На рисунку 2 подано порівняння трьох стратегій оптимізації логістичних процесів за двома ключовими критеріями – зниженням витрат (%) та

покращення рівня сервісу (SLA, %). Традиційна стратегія *cost-cutting* розташована у нижньому лівому куті графіка: вона забезпечує помітне скорочення витрат (близько 12-13%), однак має найнижчий ефект на показники сервісу (близько 5-6%). Інноваційна стратегія цифровізації знаходиться у правому верхньому сегменті, демонструючи не лише найвище зниження витрат (до 18%), але й максимальне покращення SLA (до 15%), що відображає ефект від застосування алгоритмічної маршрутизації та цифрових технологій управління попитом. Комбінована стратегія займає проміжну позицію: її економічний ефект становить близько 16%, а покращення SLA близько 12%, що свідчить про досягнення компромісу між економією та стійкістю системи.

Таким чином, рисунок наочно ілюструє компромісний характер стратегічних рішень: традиційний підхід орієнтований переважно на скорочення витрат, інноваційний – на інтегроване зниження витрат і підвищення сервісу, а комбінований – на балансування між двома цілями, особливо важливе в умовах стохастичних збурень та ризику перебоїв у ланцюгах постачання.



**Рис. 2. Компромiс між економією та сервісом у традиційній, інноваційній та комбінованій стратегіях оптимізації логістики**  
\*Сформовано авторами за результатами досліджень.

Базовим критерієм оцінки ефективності використання трудових ресурсів у виробничих і логістичних системах є продуктивність праці одного робітника, яка визначається співвідношенням між обсягом випуску продукції та середньосписковою чисельністю робітників. Таким чином, чим більший обсяг виробництва за сталої кількості персоналу, тим вищим є рівень продуктивності праці.

Для оцінки економічної ефективності логістичних стратегій застосовується певний набір інтегральних показників. Ключовим серед них є показник повних логістичних витрат (ТСО), який формується як сума витрат на транспорт, складування, запаси, а також втрат від дефіциту чи надлишку запасів і



адміністративних витрат. Така конструкція дозволяє комплексно оцінити фінансовий тягар логістики для компанії.

Важливим критерієм виступає економія від реалізації певної стратегії, яка визначається як різниця між базовими витратами та витратами після впровадження обраних рішень. На її основі розраховується чистий економічний ефект, що дорівнює отриманій економії за мінусом інвестиційних і додаткових операційних витрат. Це дає змогу відокремити реальний фінансовий результат від номінальної економії.

Для оцінки інвестиційної привабливості стратегій використовують показники ROI (рентабельність інвестицій) і період окупності. Вони характеризують співвідношення економії до витрат на реалізацію та час, необхідний для повернення вкладених коштів. Динамічним аналогом цих показників є чиста теперішня вартість (NPV), що враховує ефект від економії у часовому розрізі із застосуванням ставки дисконту. Це дозволяє враховувати вартість грошей у часі й робити більш обґрунтовані висновки щодо доцільності стратегій.

Окрім витрат, вагоме значення мають показники ефективності сервісу. Собівартість обслуговування (Cost-to-Serve) визначається як відношення повних витрат до кількості виконаних замовлень, що відображає середні витрати на одне замовлення. Рівень сервісу (SLA) оцінюється як частка доставок, здійснених у межах допустимого часу. Додатково враховується середній час циклу виконання замовлення та коефіцієнт задоволення попиту (fill rate), який показує, яку частку попиту вдалося задовольнити без дефіциту. Важливим екологічним критерієм виступає обсяг викидів CO<sub>2</sub>, що розраховується за даними транспортних операцій та енергоспоживання складів.

Сучасні методи також включають моделювання невизначеності. У цьому контексті застосовується Монте-Карло оцінка, яка дає змогу обчислити очікуване значення ключових показників шляхом багатократних прогонів моделі. З огляду на ризики використовується ризик-скоригована вартість, що включає як очікувані витрати, так і показник CVaR (Conditional Value-at-Risk), зважений на коефіцієнт ризик-апетиту.

Для багатокритеріальної оптимізації стратегій формулюється задача мінімізації одночасно трьох показників: сукупних витрат, негативного рівня сервісу та обсягів викидів. Це створює основу для пошуку рішень, що забезпечують збалансованість економічної, сервісної та екологічної ефективності. У сфері управління запасами часто використовується політика (s,S), за якої витрати формуються з урахуванням витрат на замовлення, витрат на зберігання і штрафів за дефіцит, тоді як випадкові відхилення запасів моделюються як надлишок або нестача.

Додатково застосовується сценарний аналіз, у межах якого чистий ефект стратегії оцінюється як зважена сума економії в різних сценаріях розвитку подій з урахуванням їхніх імовірностей. Це дає можливість врахувати не лише середній очікуваний результат, а й варіативність середовища.

Нарешті, інструментарій нечіткої логіки забезпечує інтеграцію якісних оцінок у кількісні моделі. Наприклад, правило Мамдані дозволяє поєднувати рівень сервісу та ризик у єдиній функції належності, що відображає ефективність. Після цього застосовується процедура дефазифікації (метод центру тяжіння), яка надає числове значення інтегральної ефективності.

У сукупності ці підходи утворюють методологічно повний каркас для оцінювання економічної ефективності логістичних стратегій, де поєднуються фінансові, сервісні, екологічні та ризик-орієнтовані критерії.

Для моделювання впливу часового фактора на ключові KPI рекомендовано візуалізувати Парето-фронт для (TCO; SLA; CO<sub>2e</sub>) і подавати еластичності KPI до змін політик:  $\Delta \text{TCO} / \Delta$  (рівень запасів),  $\Delta \text{SLA} / \Delta$  (частота відправок),  $\Delta \text{CO}_2e / \Delta$  (тип транспорту).

Для задач маршрутизації необхідно порівняти класичний VRP і «зелений» VRP з гнучкими вікнами: зазвичай цифрові/евристичні стратегії покращують компроміс між рівнем витрат, викидів і сервісу [12].

Застосовність дискретно-подієвого моделювання у логістиці переконливо проявляється на трьох репрезентативних кейсах, і в кожному з них висновок спирається не на описові спостереження, а на причинно-наслідкову логіку. По-перше, у складських системах із крос-докінгом DES із явними ресурсними обмеженнями (стелажі, вузли комплектування, доки) дозволяє коректно порівнювати *wave* та *waveless* підходи. Перевага *waveless* виникає там, де мікс замовлень часто змінюється: без «жорсткого» запуску хвиль система згладжує піки, скорочує непродуктивні очікування пікерів і тим самим зменшує трудо- й часомісткість без втрати SLA.

Водночас, при стабільних партіях та високій потребі синхронізації доків, хвилі забезпечують краще завантаження «вузьких місць». Висновок випливає з механіки системи: зміни стану відбуваються саме в точках подій (прибуття/відвантаження, завершення комплектування), тож оптимальне правило – те, що мінімізує черги біля критичних ресурсів за даного розподілу попиту.

По-друге, в «останній милі» імітація з варіативними часовими вікнами та стохастичними заторами показує, що «зелена» маршрутизація зі зваженою цільовою функцією (паливо, викиди, штрафи за запізнення) знижує TCO і стабілізує сервіс не «всупереч», а «завдяки» внутрішній дисципліні моделі: включення зовнішніх ефектів у ціну рішення перерозподіляє навантаження в часі / просторі, скорочує непродуктивні пробіги й ризики штрафів; можливе подовження шляху компенсується меншими затримками у випадкових заторах і нижчими очікуваними штрафами.

По-третє, для управління запасами Монте-Карло-аналіз параметричних (s, S) за випадкових lead time і змінної надійності постачальників обґрунтовує перевагу адаптивних політик: коли волатильність попиту/постачання змінюється, статичні пороги систематично недо- або переоцінюють страховий



запас, тоді як правила, що «підлаштовують»  $s$ ,  $S$  і  $safety\ stock$  до поточної дисперсії, мінімізують сумарні витрати дефіциту/надлишку.

Сукупно ці результати узгоджуються з resilient-орієнтованою парадигмою, адже оптимальними стають не сталі налаштування, а політики, чутливі до змін. Водночас коректність висновків вимагає калібрування розподілів на емпіричних даних, плану експерименту (DOE) та аналізу чутливості; інакше існує ризик перенесення рішень поза межі, де припущення моделі зберігають валідність. Таким чином, DES за чітко верифікованих припущень дає керовані, економічно інтерпретовані компроміси між витратами та сервісом у різних підсистемах ланцюга постачання.

Практична значущість проведених досліджень проявляються на кількох рівнях: бізнесовому, державному та науковому. Для компаній короткостроковий горизонт рішень вимагає швидких ефектів на P&L, що зазвичай досягається за рахунок таргетованих *cost-cutting* заходів – раціоналізації партій чи перерозподілу складування. Однак досвід показує, що такі результати мають бути обов'язково протестовані в імітаційному середовищі: лише *stress-tests* на основі DES дозволяють оцінити, чи не призведе локальна економія до небажаних побічних ефектів у суміжних процесах.

У середньо- та довгостроковій перспективі перевага переходить до цифрових та «зелених» стратегій, які базуються на аналітиці попиту, алгоритмічній маршрутизації та впровадженні екологічних транспортних рішень. Багатокритеріальні моделі та сучасні огляди DES/ML підтверджують, що саме ці підходи в умовах невизначеності та регуляторного тиску (зокрема через вуглецеві політики) забезпечують кращі інтегральні результати, а не лише вузьке скорочення витрат. Водночас ключовим управлінським інструментом поступово стає «digital twin» логістики з модульною архітектурою, де поєднуються оптимізаційні алгоритми, DES та нечіткі оцінювачі сервісу й ризику. Це рішення суттєво здешевлює та прискорює А/В-перевірку політик ще до їхнього впровадження в реальних ланцюгах постачання [12].

З точки зору державної політики практичні висновки зводяться до потреби створення інфраструктурних та інституційних умов для масштабування таких рішень. У центрі уваги мають бути інтегровані цифрові платформи обміну даними, що стандартизують відстеження та синхронізацію попиту і пропозиції, а також розбудова кластерів логістичних центрів та «зелених коридорів» для вантажів. Досвід і міжнародні огляди (OECD) підтверджують, що стійкість ланцюгів постачання вимагає диверсифікації постачальників, буферних потужностей та модернізації митної й прикордонної логістики. Такі заходи економічно виправдані, оскільки знижують системні ризики й сумарні витрати для економіки загалом.

Нарешті, для науки імплікації стосуються методології та майбутніх дослідницьких напрямів. Методологічний пріоритет віддається гібридним підходам, які поєднують оптимізацію, DES, нечітку логіку та методи машинного навчання, а також передбачають створення відтворюваних наборів даних і

відкритих реплікацій. Науковий запит формується навколо трьох ключових тем: по-перше, це економетрично підкріплені моделі стійкості з вимірюваними ефектами політик; по-друге, інтеграція екологічних обмежень у КРІ бізнес-рішень; по-третє, валідація нечітких показників сервісу та ризику на мультисекторальних даних. Сучасні огляди [13] одноставно підтверджують, що наукове поле потребує саме інтегрованих підходів, які поєднують економічну, екологічну та соціальну виміри управління ланцюгами постачання.

**Висновки та перспективи подальших досліджень.** Проведене дослідження показало, що застосування імітаційного моделювання та інструментів нечіткої логіки дозволяє значно підвищити економічну ефективність логістичних стратегій в умовах невизначеності. Отримані результати підтвердили, що комбіновані підходи, які поєднують традиційні методи скорочення витрат із цифровими рішеннями та принципами сталості, забезпечують найкращий баланс між економією ресурсів, якістю сервісу та екологічними параметрами. Порівняльний аналіз засвідчив, що короткострокові стратегії здебільшого орієнтовані на швидке скорочення витрат, тоді як довгострокові вимагають інвестицій у цифровізацію та адаптивність.

Водночас залишається низка питань, що потребують подальшого опрацювання, зокрема більш точна інтеграція ризик-менеджменту та оцінка соціально-економічних ефектів логістичних стратегій. Перспективними є дослідження, спрямовані на поєднання економічних моделей із системами штучного інтелекту та машинного навчання для прогнозування поведінки ринку й попиту. Подальші наукові розвідки також мають охоплювати розробку інструментів багатокритеріальної оптимізації, які одночасно враховуватимуть економічні, екологічні та соціальні чинники.

### Список використаних джерел

1. Badakhshan E., Mustafee N., Bahadori R. Application of simulation and machine learning in supply chain management: A synthesis of the literature using the Sim-ML literature classification framework, *Computers & Industrial Engineering*. 2024. Vol. 198, 110649. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cie.2024.110649>.
2. Bottani E., Casella G. Discrete-event simulation in logistics and supply chain management: a scientometric perspective. *Production & Manufacturing Research*. 2024. № 12 (1). DOI: <https://doi.org/10.1080/21693277.2024.2415038>
3. Korder B., Maheut J., Konle M. Simulation Methods and Digital Strategies for Supply Chains Facing Disruptions: Insights from a Systematic Literature Review. *Sustainability*. 2024. № 16 (14), 5957. DOI: <https://doi.org/10.3390/su16145957>
4. Hosseini Shekarabi S., Kiani Mavi R., Romero Macau F. Supply Chain Resilience: A Critical Review of Risk Mitigation, Robust Optimisation, and Technological Solutions and Future Research Directions. *Glob J Flex Syst Manag*. 2025. № 26. P. 681–735. DOI: <https://doi.org/10.1007/s40171-025-00458-8>
5. Karabacak E., Kutlu H. A. Evaluating the Efficiencies of Logistics Centers with Fuzzy Logic: The Case of Turkey. *Sustainability*. 2024. № 16(1), 438. DOI: <https://doi.org/10.3390/su16010438>
6. Xie D., Qiu Y., Huang J. Multi-objective optimization for green logistics planning and operations management: From economic to environmental perspective. *Computers & Industrial Engineering*. 2024. Vol. 189, 109988. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cie.2024.109988>.



7. Schiffmann O., Hicks B., Nassehi A., Gopsill J., Valero M. A Cost–Benefit Analysis Simulation for the Digitalisation of Cold Supply Chains. *Sensors*. 2023. № 23(8), 4147. DOI: <https://doi.org/10.3390/s23084147>
8. Becerra P., Mula J., Sanchis R. Optimising location, inventory and transportation in a sustainable closed-loop supply chain. *International Journal of Production Research*. 2023. № 62(5). P. 1609–1632. DOI: <https://doi.org/10.1080/00207543.2023.2197515>
9. Li F., Tao J., Wang Q. *et al.* Simulation and optimization of cold chain logistics system towards lower carbon emission: a state-of-the-art review. *Carbon Res*. 2025. № 4, 22. DOI: <https://doi.org/10.1007/s44246-024-00191-4>
10. Cai H., Xu P., Tang X., Lin G. Solving the Vehicle Routing Problem with Stochastic Travel Cost Using Deep Reinforcement Learning. *Electronics*. 2024. № 13(16), 3242. DOI: <https://doi.org/10.3390/electronics13163242>
11. Gülmez B., Emmerich M., Fan Y. Multi-objective Optimization for Green Delivery Routing Problems with Flexible Time Windows. *Applied Artificial Intelligence*. 2024. № 38(1). DOI: <https://doi.org/10.1080/08839514.2024.2325302>
12. Tayyab M., Malik A .I., Khan I., Ullah M. A simulation-optimization approach for economic assessment of an imperfect serial production management under uncertainty. *Journal of Industrial and Production Engineering*. 2024. № 41. P. 1-18. DOI: <https://doi.org/10.1080/21681015.2024.2355964>
13. Khalili-Fard A., Sabouhi F., Bozorgi-Amiri A. Data-driven robust optimization for a sustainable steel supply chain network design: Toward the circular economy. *Computers & Industrial Engineering*. 2024. Vol. 195. DOI: 110408. <https://doi.org/10.1016/j.cie.2024.110408>.

### References

1. Badakhshan, E., Mustafee, N., & Bahadori, R. (2024). Application of simulation and machine learning in supply chain management: A synthesis of the literature using the Sim-ML literature classification framework, *Computers & Industrial Engineering*, 198, 110649, <https://doi.org/10.1016/j.cie.2024.110649>
2. Bottani, E., & Casella, G. (2024). Discrete-event simulation in logistics and supply chain management: a scientometric perspective. *Production & Manufacturing Research*, 12 (1). <https://doi.org/10.1080/21693277.2024.2415038>
3. Korder, B., Maheut, J., & Konle, M. (2024). Simulation Methods and Digital Strategies for Supply Chains Facing Disruptions: Insights from a Systematic Literature Review. *Sustainability*, 16(14), 5957. <https://doi.org/10.3390/su16145957>
4. Hosseini Shekarabi, S., Kiani Mavi, R. & Romero Macau, F. (2025). Supply Chain Resilience: A Critical Review of Risk Mitigation, Robust Optimisation, and Technological Solutions and Future Research Directions. *Glob J Flex Syst Manag*, 26, 681-735. <https://doi.org/10.1007/s40171-025-00458-8>
5. Karabacak, E., & Kutlu, H. A. (2024). Evaluating the Efficiencies of Logistics Centers with Fuzzy Logic: The Case of Turkey. *Sustainability*, 16(1), 438. <https://doi.org/10.3390/su16010438>
6. Xie, D., Qiu, Y., & Huang, J. (2024). Multi-objective optimization for green logistics planning and operations management: From economic to environmental perspective. *Computers & Industrial Engineering*, 189, 109988. <https://doi.org/10.1016/j.cie.2024.109988>
7. Schiffmann, O., Hicks, B., Nassehi, A., Gopsill, J., & Valero, M. (2023). A Cost–Benefit Analysis Simulation for the Digitalisation of Cold Supply Chains. *Sensors*, 23(8), 4147. <https://doi.org/10.3390/s23084147>
8. Becerra, P., Mula, J., & Sanchis, R. (2023). Optimising location, inventory and transportation in a sustainable closed-loop supply chain. *International Journal of Production Research*, 62(5), 1609–1632. <https://doi.org/10.1080/00207543.2023.2197515>



9. Li, F., Tao, J., Wang, Q. *et al.* (2025). Simulation and optimization of cold chain logistics system towards lower carbon emission: a state-of-the-art review. *Carbon Res*, 4, 22. <https://doi.org/10.1007/s44246-024-00191-4>
10. Cai, H., Xu, P., Tang, X., & Lin, G. (2024). Solving the Vehicle Routing Problem with Stochastic Travel Cost Using Deep Reinforcement Learning. *Electronics*, 13(16), 3242. <https://doi.org/10.3390/electronics13163242>
11. Gülmez, B., Emmerich, M., & Fan, Y. (2024). Multi-objective Optimization for Green Delivery Routing Problems with Flexible Time Windows. *Applied Artificial Intelligence*, 38(1). <https://doi.org/10.1080/08839514.2024.2325302>
12. Tayyab M., Malik A .I., Khan I., Ullah M. (2024). A simulation-optimization approach for economic assessment of an imperfect serial production management under uncertainty. *Journal of Industrial and Production Engineering*, 4, 1-18. <https://doi.org/10.1080/21681015.2024.2355964>
13. Khalili-Fard, A., Sabouhi, F., Bozorgi-Amiri, A. (2024). Data-driven robust optimization for a sustainable steel supply chain network design: Toward the circular economy. *Computers & Industrial Engineering*, 195, 110408. <https://doi.org/10.1016/j.cie.2024.110408>

|                    |            |             |            |            |            |
|--------------------|------------|-------------|------------|------------|------------|
| Отримано:          | 12.09.2025 | Beérkezett: | 2025.09.12 | Received:  | 12.09.2025 |
| Прийнято до друку: | 25.11.2025 | Elfogadva:  | 2025.11.25 | Accepted:  | 25.11.2025 |
| Опубліковано:      | 17.12.2025 | Megjelent:  | 2025.12.17 | Published: | 17.12.2025 |