

**Ільницький В.В.**аспірант кафедри менеджменту і міжнародного підприємництва  
Національного університету «Львівська політехніка»ORCID: <https://orcid.org/0009-0004-9585-753X>**Русин-Гриник Р.Р.**PhD, доцент кафедра підприємництва та екологічної експертизи товарів  
Національного університету «Львівська політехніка»ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2895-6437>**Ilnytskyi Viktor, Rusyn-Hrynyk Roman**

Lviv Polytechnic National University

**ОПТИМІЗАЦІЯ ФОРМУВАННЯ СИСТЕМИ МІЖНАРОДНИХ  
ТРАНСПОРТНИХ ПЕРЕВЕЗЕНЬ В ЕКСТРЕМАЛЬНИХ УМОВАХ****OPTIMIZATION OF THE FORMATION OF THE INTERNATIONAL  
TRANSPORT SYSTEM IN EXTREME CONDITIONS**

Обґрунтовано, що в умовах сучасних глобальних викликів, таких як природні катастрофи, збройні конфлікти, економічні кризи та пандемії, існує нагальна потреба у вдосконаленні системи міжнародних транспортних перевезень. Ефективне управління логістичними процесами в екстремальних умовах є критичним для забезпечення безперервності постачання та мінімізації економічних втрат. Доведено, що використання цифрових технологій, таких як Інтернет речей (IoT), великі дані (Big Data) та штучний інтелект (ШІ), сприяє підвищенню ефективності, точності та адаптивності логістичних процесів. Інтернет речей забезпечує збирання даних у реальному часі, великі дані дозволяють аналізувати та інтерпретувати ці дані для прийняття обґрунтованих рішень, а штучний інтелект оптимізує маршрути та прогнозує можливі ризики. Аргументовано, що інтеграція цих технологій у єдину систему управління міжнародними транспортними перевезеннями є найбільш перспективним методом для досягнення високої ефективності у складних та непередбачуваних умовах. Математичні моделі та формули, що використовуються для опису цих процесів, дозволяють точно оцінювати витрати, якість даних, витрати на обслуговування, а також рівень адаптивності та стійкості системи. Проте, впровадження цих технологій не є позбавленим недоліків. Високі витрати на початковому етапі, питання безпеки та конфіденційності даних, складність інтеграції різних систем, а також залежність від якості зібраних даних можуть стати значними перешкодами. Обґрунтовано, що для подолання цих недоліків необхідно застосовувати поступовий підхід до впровадження технологій, використовувати надійні алгоритми шифрування, стандартизовані протоколи та інтерфейси, а також забезпечувати регулярний моніторинг та валідацію даних. Узагальнюючи, можна стверджувати, що оптимізація системи міжнародних транспортних перевезень з використанням цифрових технологій в екстремальних умовах є необхідною та доцільною. Це дозволяє забезпечити стабільність постачань, знизити витрати, підвищити рівень безпеки та адаптивності системи. Впровадження цього методу вимагає ретельного планування, значних інвестицій та постійного вдосконалення, що в кінцевому підсумку приведе до покращення ефективності та стійкості логістичних процесів у глобальному масштабі.

**Ключові слова:** міжнародні транспортні перевезення, адаптивні системи, логістичні процеси, інтернет речі, великі дані, екстремальні умови.

It has been substantiated that in the context of modern global challenges such as natural disasters, armed conflicts, economic crises, and pandemics, there is an urgent need to improve the system of international transport logistics. Effective management of logistics processes in extreme conditions is critical to ensuring supply chain continuity and minimizing economic losses. It has been proven that the use of digital technologies such as the Internet of Things (IoT), Big Data, and Artificial Intelligence (AI) enhances the efficiency, accuracy, and adaptability of logistics operations. The Internet of Things enables real-time data collection, Big Data facilitates the analysis and interpretation of this data for informed decision-making, and Artificial Intelligence optimizes routes and predicts potential risks. It has been argued that the integration of these technologies into a unified international transport management system is the most promising method for achieving high efficiency in complex and

unpredictable conditions. Mathematical models and formulas used to describe these processes allow for accurate assessment of costs, data quality, maintenance expenses, as well as the adaptability and resilience of the system. However, the implementation of these technologies is not without challenges. High initial investment costs, data security and privacy concerns, integration complexity of different systems, and dependence on data quality can become significant obstacles. It has been substantiated that overcoming these challenges requires a gradual approach to technology implementation, the use of reliable encryption algorithms, standardized protocols and interfaces, as well as regular monitoring and data validation. In summary, optimizing the international transport system through digital technologies in extreme conditions is both necessary and feasible. This approach ensures supply chain stability, reduces costs, enhances security, and increases the adaptability of the system. The implementation of this method requires careful planning, substantial investments, and continuous improvement, ultimately leading to greater efficiency and resilience in global logistics operations.

**Keywords:** international transport logistics, adaptive systems, logistics processes, Internet of Things, Big Data, extreme conditions.

**Постановка проблеми.** Сучасні глобальні виклики, такі як природні катастрофи, збройні конфлікти та економічні кризи, суттєво ускладнюють міжнародні транспортні перевезення, спричиняючи перебої в постачанні та економічні втрати. Традиційні методи управління логістикою в екстремальних умовах часто виявляються недостатньо гнучкими та ефективними. Відсутність сучасних інструментів моніторингу та прогнозування ризиків, обмеженість управлінських підходів і слабка координація між учасниками логістичного процесу створюють додаткові труднощі.

Оптимізація транспортних перевезень із використанням цифрових технологій, зокрема Інтернету речей (IoT), великих даних (Big Data) та штучного інтелекту (ШІ), може значно підвищити ефективність управління логістичними процесами. Ці технології дозволяють здійснювати моніторинг у реальному часі, прогнозувати ризики, автоматизувати процеси управління та покращувати координацію між усіма учасниками перевезень.

Однак впровадження цифрових технологій пов'язане з низкою викликів, зокрема високими фінансовими витратами, питаннями кібербезпеки, складністю інтеграції систем та необхідністю забезпечення якості даних. Вирішення цих проблем потребує комплексного підходу до розробки ефективної системи міжнародних транспортних перевезень, яка здатна адаптуватися до екстремальних умов і забезпечувати безперебійне постачання в будь-яких ситуаціях.

**Аналіз останніх досліджень та публікацій.** Сучасні дослідження активно вивчають вплив екстремальних умов на міжнародні та національні транспортні системи, акцентуючи увагу на їхній адаптації. Значний внесок у цю тему зробили Baglin C. [1], Stahl L., Filosa G., Lawless E., Poe C. [2], Miao X., Banister D., Tang Y., Li M., Xi B. [3], Testa A., Furtado M., Alipour A. [4], Sealy K., Hoyle B., Knowles R. [5], Markolf S., Hoehne C., Fraser A., Chester M., Underwood B.

[6], Kaewunruen S., Sussman J., Matsumoto A. [7], Doll C., Papanikolaou A., Maurer H. [8], Hao Y., Yin Y., Lan J. [9], Balakrishnan H. [10], Simkiss D. [11]. Однак досі не сформовано єдиної класифікації міжнародних транспортних перевезень в екстремальних умовах. Дослідження зосереджені переважно на окремих аспектах, що ускладнює системний підхід до управління ризиками.

Необхідно розробити комплексну систему класифікаційних ознак, яка дозволить: ідентифікувати типи екстремальних, оцінити критичність їхнього впливу та потенційні наслідки для логістики, створити адаптивні алгоритми реагування, що включають резервні маршрути, оптимізацію ресурсів та цифрові технології. Для цього необхідна інтеграція аналітики Big Data, ШІ та IoT, що дозволить ефективно прогнозувати ризики та оперативно ухвалювати управлінські рішення. Формування єдиної класифікаційної моделі стане важливим кроком для підвищення стійкості міжнародних перевезень у кризових умовах.

**Мета статті** – оптимізація системи міжнародних транспортних перевезень в екстремальних умовах шляхом впровадження сучасних цифрових технологій, таких як штучний інтелект (ШІ), великі дані (Big Data) та Інтернет речей (IoT).

**Виклад основного матеріалу дослідження.** Актуальність оптимізації формування системи міжнародних транспортних перевезень в екстремальних умовах з практичної точки зору обумовлена низкою обставин:

- екстремальні умови, такі як природні катастрофи, збройні конфлікти, економічні кризи або пандемії, значно ускладнюють логістичні процеси, що призводить до перебоїв у постачанні та суттєвих економічних втрат. В таких умовах швидке та ефективне реагування на змінені обставини є критичним для забезпечення безперервності постачань;

- оптимізація транспортних перевезень дозволяє мінімізувати витрати та підвищити ефективність використання ресурсів. В екстре-

мальних умовах це набуває особливого значення, оскільки ресурси можуть бути обмеженими, а вартість логістичних операцій різко зростати. За допомогою сучасних технологій, таких як GPS-моніторинг, штучний інтелект та аналітика даних, можна розробити оптимальні маршрути, передбачити можливі ризики та швидко адаптуватися до нових викликів;

- забезпечення безпеки вантажів і транспорту є ще однією важливою складовою оптимізації в екстремальних умовах. Підвищення рівня контролю за перевезеннями, використання надійних засобів зв'язку та спеціалізованого обладнання допомагають знизити ризик втрат або пошкоджень вантажів, а також забезпечити безпеку водіїв і персоналу;

- міжнародні транспортні перевезення в екстремальних умовах вимагають тісної координації між різними учасниками логістичного ланцюга, включаючи державні органи, приватні компанії та міжнародні організації. Оптимізація цих процесів сприяє підвищенню рівня співпраці та взаємодії, що, в свою чергу, дозволяє швидше і ефективніше вирішувати виникаючі проблеми.

Таким чином, оптимізація системи міжнародних транспортних перевезень в екстремальних умовах є актуальною і необхідною для забезпечення стабільності постачань, зниження витрат, підвищення безпеки та покращення координації між усіма учасниками логістичних процесів.

Серед альтернативних методів оптимізації формування системи міжнародних транспортних перевезень в екстремальних умовах доцільно виділити такі, як: використання цифрових технологій (використання цифрових технологій, включає в себе такі інструменти, як штучний інтелект (ШІ), великі дані (Big Data) та Інтернет речей (IoT). ШІ може прогнозувати можливі ризики та оптимізувати маршрути перевезень, враховуючи поточні умови. Великі дані дозволяють аналізувати значні обсяги інформації для прийняття обґрунтованих рішень, а IoT забезпечує реальний час моніторинг транспортних засобів та вантажів. Цей метод забезпечує високу точність і швидкість реагування на змінні умови, проте вимагає значних інвестицій у технології та навчання персоналу), застосування гнучких логістичних моделей (застосування гнучких логістичних моделей, передбачає використання адаптивних стратегій, що дозволяють швидко перебудовувати логістичні процеси в залежності від поточних умов. Це може включати перерозподіл ресурсів, зміну маршрутів або навіть використання альтернативних видів транспорту. Гнучкі моделі забезпечують високу адаптивність і стійкість системи, проте потребують ретельного планування та наявності резервних потужностей), впровадження

мультимодальних перевезень (впровадження мультимодальних перевезень, що передбачає комбінування різних видів транспорту (автомобільного, залізничного, морського та авіаційного) для забезпечення максимальної ефективності перевезень. Це дозволяє мінімізувати ризики, пов'язані з перебоями в роботі одного виду транспорту, та оптимізувати витрати. Мультимодальні перевезення є ефективними, але можуть бути складними в управлінні та вимагати високого рівня координації між різними транспортними операторами) та розвиток співпраці з міжнародними організаціями (розвиток співпраці з міжнародними організаціями та участь у міжнародних ініціативах, спрямованих на покращення логістичних процесів. Це може включати спільні проекти, обмін досвідом та технологіями, а також участь у міжнародних стандартах та протоколах. Така співпраця дозволяє підвищити ефективність та безпеку перевезень, проте може вимагати значного часу та зусиль для налагодження відносин).

Порівнюючи ці методи, можна дійти висновку, що кожен з них має свої переваги та недоліки. Використання цифрових технологій забезпечує високу точність та швидкість реагування, але потребує значних інвестицій. Гнучкі логістичні моделі забезпечують високу адаптивність, але вимагають ретельного планування. Мультимодальні перевезення оптимізують витрати та знижують ризики, але можуть бути складними в управлінні. Співпраця з міжнародними організаціями підвищує ефективність та безпеку, але потребує часу та зусиль.

Вибір найкращого методу залежить від конкретних умов та ресурсів. У сучасних умовах найбільш перспективним виглядає використання цифрових технологій, оскільки вони забезпечують високу ефективність, точність та швидкість реагування, що є критичним в екстремальних умовах. Впровадження ШІ, великих даних та IoT дозволяє значно підвищити рівень управління логістичними процесами та знизити ризики, що робить цей метод найбільш обґрунтованим вибором для оптимізації міжнародних транспортних перевезень в екстремальних умовах.

Використання цифрових технологій для оптимізації системи міжнародних транспортних перевезень в екстремальних умовах може бути розглянуто через призму кількох ключових компонентів: штучний інтелект (ШІ), великі дані (Big Data) та Інтернет речей (IoT). Розглянемо кожен з цих компонентів більш детально.

1. Штучний інтелект (ШІ). ШІ може бути використаний для прогнозування ризиків, оптимізації маршрутів та підвищення ефективності логістичних операцій. Основні аспекти його застосування включають:

1.1. Прогнозування ризиків. ШІ аналізує історичні дані та поточну інформацію для прогнозування можливих ризиків, таких як погодні умови, природні катастрофи або соціальні конфлікти. Це дозволяє заздалегідь підготуватися до можливих перебоїв і розробити альтернативні плани.

1.2. Оптимізація маршрутів. Використовуючи алгоритми машинного навчання, ШІ здатний розробляти найоптимальніші маршрути перевезень, враховуючи такі фактори, як трафік, стан доріг, вартість палива та інші змінні. Це дозволяє мінімізувати час доставки та знизити витрати.

1.3. Автоматизація операцій. ШІ може автоматизувати різні аспекти логістичних процесів, такі як управління запасами, планування завантаження/розвантаження та інші операційні задачі. Це підвищує ефективність та знижує ймовірність людських помилок.

2. Великі дані (Big Data). Великі дані забезпечують можливість аналізувати значні обсяги інформації для прийняття обґрунтованих рішень. Основні аспекти застосування включають:

2.1. Аналіз даних у реальному часі. Системи обробки великих даних дозволяють аналізувати інформацію у реальному часі, що важливо для оперативного реагування на змінні умови. Це може включати аналіз даних з різних джерел, таких як GPS-трекери, сенсори IoT, соціальні медіа та інші.

2.2. Виявлення тенденцій та аномалій. Аналіз великих даних дозволяє виявляти тенденції та аномалії, які можуть вказувати на потенційні проблеми або можливості для оптимізації. Це допомагає приймати проактивні рішення та уникати можливих перебоїв.

2.3. Підтримка прийняття рішень. Великі дані надають керівникам логістичних операцій необхідну інформацію для прийняття стратегічних рішень. Це включає аналіз ефективності різних маршрутів, постачальників та партнерів.

3. Інтернет речей (IoT). IoT забезпечує моніторинг та контроль транспортних засобів і вантажів у реальному часі. Основні аспекти застосування включають:

3.1. Моніторинг транспорту. Сенсори IoT, встановлені на транспортних засобах, забезпечують відстеження їхнього місцезнаходження, стану та параметрів руху. Це дозволяє оперативно реагувати на будь-які відхилення від запланованого маршруту або технічні проблеми.

3.2. Моніторинг вантажів. Сенсори IoT можуть відстежувати стан вантажів, включаючи температуру, вологість, ударні навантаження та інші параметри. Це особливо важливо для перевезення товарів, чутливих до умов зберігання та транспортування.

3.3. Інтеграція з іншими системами: IoT дозволяє інтегрувати дані з різних джерел в єдину систему управління, що підвищує ефективність координації та прийняття рішень.

Механізм взаємодії вказаних ключових компонентів, в контексті оптимізації формування системи міжнародних транспортних перевезень в екстремальних умовах, будується на інтеграції та взаємодії цих технологій для досягнення максимальної ефективності та адаптивності логістичних процесів. Так, IoT є основою для збору даних у реальному часі з різних джерел. Сенсори, встановлені на транспортних засобах і контейнерах, забезпечують моніторинг їхнього стану, включаючи місцезнаходження, швидкість, температуру, вологість та інші критичні параметри. Наприклад, сенсори можуть виявляти можливі технічні несправності, відхилення від запланованого маршруту або зміни умов зберігання вантажу. Ці дані передаються в централізовану систему для подальшої обробки. Зібрані дані з IoT-пристроїв накопичуються у великих обсягах і потребують аналізу для виявлення корисних інсайтів. Технології Big Data дозволяють обробляти та аналізувати ці дані, витягуючи з них інформацію, яка може бути використана для прийняття рішень. Аналіз великих даних включає в себе обробку історичних даних для виявлення тенденцій, прогнозування можливих ризиків та оптимізації маршрутів. Наприклад, аналіз даних про дорожній трафік і погодні умови дозволяє прогнозувати можливі затримки та вибирати найефективніші маршрути. ШІ використовує оброблені великі дані для навчання моделей машинного навчання, які здатні автоматично приймати рішення та оптимізувати логістичні процеси. ШІ може передбачати ризики, аналізуючи дані в реальному часі, і пропонувати оптимальні маршрути та стратегії перевезень. Наприклад, алгоритми машинного навчання можуть передбачати можливі затори на дорогах, аварії або інші екстремальні ситуації, що дозволяє оперативно змінювати маршрути та уникати затримок.

Таким чином, взаємодія компонентів IoT, Big Data та ШІ створює потужну та гнучку систему управління міжнародними транспортними перевезеннями, здатну ефективно реагувати на екстремальні умови. Ця система забезпечує високу адаптивність, точність та оперативність у прийнятті рішень, що є критичним для збереження стабільності логістичних ланцюгів у складних умовах.

Виконані нами дослідження дозволяють стверджувати, що для успішного впровадження цифрових технологій в систему міжнародних транспортних перевезень необхідні:

1. Інвестування в інфраструктуру. Це включає придбання та встановлення необхідного

обладнання (сенсори, GPS-трекери), а також програмного забезпечення для обробки та аналізу даних.

2. Навчання персоналу. Персонал повинен бути навчений роботі з новими технологіями, включаючи використання ШІ, аналіз великих даних та управління IoT-пристроями.

3. Розробка стандартів та протоколів. Необхідно розробити внутрішні стандарти та протоколи для використання цифрових технологій, щоб забезпечити їх ефективну та безпечну експлуатацію.

4. Співпраця з партнерами. Важливо налагодити співпрацю з постачальниками, транспортними компаніями та іншими партнерами для забезпечення інтеграції систем та обміну даними.

Таким чином, використання цифрових технологій в якості методу оптимізації формування системи міжнародних транспортних перевезень в екстремальних умовах може значно підвищити ефективність, безпеку та стійкість логістичних операцій.

Використання цифрових технологій для оптимізації формування системи міжнародних транспортних перевезень в екстремальних умовах можна описати мовою математичних формул. Розглянемо взаємодію трьох основних компонентів: Інтернет речей (IoT), великі дані (Big Data) та штучний інтелект (ШІ).

Інтернет речей (IoT). Дані з IoT-сенсорів можна представити як множину  $D$ :

$$D = \{d_1, d_2, \dots, d_n\}, \quad (1)$$

де  $d_i$  – це дані, зібрані сенсором  $i$ . Кожен елемент  $d_i$  може містити координати, температуру, вологість, стан транспортного засобу та інші параметри.

Великі дані (Big Data). Обробка великих даних включає агрегацію, фільтрацію та аналіз даних  $D$ . Припустимо, що ми маємо функцію обробки даних  $f$ :

$$A = f(D), \quad (2)$$

де  $A$  – це множина агрегованих даних.

Функція  $f$  може включати різні статистичні методи, методи машинного навчання для виявлення аномалій та трендів.

Штучний інтелект (ШІ). ШІ використовує агреговані дані  $A$  для навчання моделі та оптимізації маршрутів. Припустимо, що модель ШІ представлена як функція  $g$ , яка приймає на вхід  $A$  і видає оптимізовані маршрути  $R$ :

$$R = g(A), \quad (3)$$

де  $R = \{r_1, r_2, \dots, r_m\}$  – це множина оптимізованих маршрутів, а  $r_i$  – це маршрут  $i$ .

Оптимізація маршрутів. Оптимізація маршрутів може бути представлена як задача мінімізації функції витрат  $C$ :

$$\min_R C(R, P), \quad (4)$$

де  $P$  – це множина параметрів, що включає витрати на паливо, час у дорозі, ризики та інші фактори.

Задачу можна розписати детальніше:

$$C(R, P) = \sum_{i=1}^m C(R_i, P_i), \quad (5)$$

де  $C(R_i, P_i)$  – це функція витрат для маршруту  $r_i$  з урахуванням параметрів  $P_i$ .

Параметри  $P_i$  можуть включати такі фактори, як:  $t_i$  – час у дорозі для маршруту  $r_i$ ;  $f_i$  – витрати на паливо для маршруту  $r_i$ ;  $s_i$  – рівень безпеки для маршруту  $r_i$ .

Математична модель взаємодії компонентів:

1. Збір даних з IoT-сенсорів:

$$D = \{d_1, d_2, \dots, d_n\}. \quad (6)$$

2. Агрегація та аналіз даних (Big Data):

$$A = f(D). \quad (7)$$

3. Прогнозування та оптимізація маршрутів (ШІ):

$$R = g(A). \quad (8)$$

4. Мінімізація функції витрат:

$$\min_R \sum_{i=1}^m C(R_i, P_i). \quad (9)$$

Таким чином, ми отримуємо оптимізовані маршрути  $R$ , які мінімізують витрати  $C$  з урахуванням параметрів  $P$  та даних, зібраних з IoT-сенсорів і оброблених за допомогою методів великих даних та штучного інтелекту.

Цей підхід дозволяє формалізувати процес оптимізації міжнародних транспортних перевезень, забезпечуючи надійність та ефективність логістичних операцій в екстремальних умовах.

Метод оптимізації формування системи міжнародних транспортних перевезень з використанням цифрових технологій має кілька потенційних недоліків. Розглянемо ці недоліки та можливі способи їх усунення (табл. 1).

Загалом, впровадження цифрових технологій для оптимізації міжнародних транспортних перевезень вимагає комплексного підходу, включаючи фінансові інвестиції, технічну підготовку та постійне вдосконалення. Успішне подолання недоліків цього методу можливе за рахунок стратегічного планування, використання найкращих практик та інноваційних технологій.

Усунення недоліків методу оптимізації формування системи міжнародних транспортних перевезень з використанням цифрових технологій

Таблиця 1

**Недоліки оптимізації формування системи міжнародних транспортних перевезень  
з використанням цифрових технологій і шляхи їх усунення**

| Недоліки                                                                                                                                                                                            | Шляхи усунення                                                                                                                                                                                                                                                                                                  |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Високі витрати на впровадження. Впровадження IoT, Big Data та ШІ вимагає значних фінансових інвестицій в обладнання, програмне забезпечення та навчання персоналу                                   | Можна поступово впроваджувати технології, починаючи з найбільш критичних ділянок логістичного ланцюга. Також варто шукати державні гранти, субсидії або партнерства з технологічними компаніями для зниження витрат                                                                                             |
| Безпека та конфіденційність даних. Зібрані дані можуть бути вразливими до кібератак та витоків інформації, що може призвести до серйозних проблем                                                   | Необхідно впроваджувати надійні системи кібербезпеки, використовувати шифрування даних та регулярно проводити аудити безпеки. Також важливо навчати персонал основам кібербезпеки                                                                                                                               |
| Складність інтеграції різних систем. Інтеграція різних IoT-пристроїв, систем обробки даних та алгоритмів ШІ може бути технічно складною та потребувати значних зусиль                               | Використання стандартних протоколів та інтерфейсів для забезпечення сумісності між різними системами. Наймання фахівців з інтеграції систем та співпраця з постачальниками технологій можуть значно полегшити цей процес                                                                                        |
| Залежність від якості даних. Ефективність ШІ та аналітики великих даних сильно залежить від якості та повноти зібраних даних. Недостовірні або неповні дані можуть призвести до неправильних рішень | Впровадження процедур для перевірки та валідації даних, використання методів очищення даних та забезпечення надійного збору даних з IoT-пристроїв. Регулярний моніторинг якості даних і коригування алгоритмів ШІ на основі нових даних також є критичними                                                      |
| Складність обслуговування та оновлення. Постійне обслуговування та оновлення технологій IoT, Big Data та ШІ може вимагати значних ресурсів                                                          | Автоматизація процесів обслуговування та використання хмарних сервісів для обробки даних можуть знизити навантаження на внутрішні ресурси компанії. Регулярне оновлення програмного забезпечення та обладнання відповідно до сучасних стандартів і технологій також допоможе зменшити складність обслуговування |
| Непередбачувані екстремальні умови. Навіть найкращі алгоритми можуть бути неспроможними передбачити всі можливі екстремальні умови або катастрофічні події                                          | Розробка резервних планів та сценаріїв дій для різних видів екстремальних ситуацій. Використання системи раннього попередження та адаптивних алгоритмів, які можуть швидко реагувати на нові дані та змінювати стратегії в реальному часі                                                                       |

*Джерело: побудовано автором*

можна описати мовою математики. Нижче наведені математичний апарат, що допоможе подолати основні недоліки.

1. Високі витрати на впровадження. Мінімізувати витрати  $C$  на впровадження можна шляхом поступового впровадження технологій. Нехай  $I$  – інвестиції,  $t$  – час,  $\alpha$  – коефіцієнт амортизації інвестицій.

$$C(t) \sum_{i=1}^n \frac{I_i}{(1+\alpha)^t}. \quad (10)$$

Ця формула описує знижені витрати на кожному етапі впровадження з урахуванням амортизації.

2. Безпека та конфіденційність даних. Для забезпечення безпеки та конфіденційності даних використаємо алгоритми шифрування. Нехай  $D$  – дані,  $E$  – зашифровані дані,  $K$  – ключ шифрування

$$E = \text{Encrypt}(D, K). \quad (11)$$

Зворотній процес:

$$D = \text{Decrypt}(E, K). \quad (12)$$

Для забезпечення стійкості алгоритмів шифрування застосуємо функції з великим обчислювальним навантаженням, наприклад, AES (Advanced Encryption Standard).

3. Складність інтеграції різних систем. Використання стандартних протоколів та інтерфейсів. Нехай  $S_i$  – система,  $P$  – протокол інтеграції

$$\text{Integrate}(S_1, S_2, \dots, S_n) = \text{Standardize}(S_1, P) \cap \text{Standardize}(S_2, P) \cap \dots \cap \text{Standardize}(S_n, P).$$

4. Залежність від якості даних

Для перевірки якості даних використовується функція  $Q(D)$ , де  $Q$  – дані,  $D$  – якість даних

$$Q(D) = \frac{\sum_{i=1}^n q(d_i)}{n}, \quad (13)$$

де  $q(d_i)$  – оцінка якості кожного елемента даних  $d_i$ .

5. Складність обслуговування та оновлення. Автоматизація процесів обслуговування через функцію  $M(t)$ , де  $M$  – витрати на обслуговування,  $t$  – час

$$M(t) = M_0 e^{-\beta t}, \quad (14)$$

де  $M_0$  – початкові витрати;

$\beta$  – коефіцієнт зниження витрат завдяки автоматизації.

6. Непередбачувані екстремальні умови. Розробка резервних планів  $R$  та сценаріїв дій  $S$ :

$$R = \sum_{i=1}^k r_i, \quad (15)$$

де  $r_i$  – резервний план для екстремальної ситуації  $i$ .

Модель адаптивних алгоритмів:

$$A(t) = A_0 + \int_0^t \gamma(E(\tau)) d\tau, \quad (16)$$

де  $A(t)$  – адаптивність алгоритму в момент часу  $t$ ;

$A_0$  – початковий рівень адаптивності;

$\gamma$  – функція реакції на екстремальні умови  $E(\tau)$  в момент часу  $\tau$ .

Інтеграція всіх компонентів у систему. Нехай  $P$  – загальна функція продуктивності системи, яка включає всі вищенаведені компоненти:

$$P = \lambda_1 C(t) + \lambda_2 Q(D) + \lambda_3 M(t) + \lambda_4 R + \lambda_5 A(t), \quad (17)$$

де  $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3, \lambda_4, \lambda_5$  – вагові коефіцієнти, що визначають значущість кожного компонента.

Загальна функція продуктивності  $P$  забезпечує комплексний підхід до оптимізації системи,

враховуючи всі важливі аспекти: витрати, якість даних, обслуговування, резервні плани та адаптивність. Оптимізація цієї функції дозволяє знайти баланс між різними факторами та забезпечити ефективне функціонування системи міжнародних транспортних перевезень в екстремальних умовах.

**Висновки.** Дослідження підтвердило важливість оптимізації міжнародних транспортних перевезень в екстремальних умовах для забезпечення стабільності постачань, зниження витрат і підвищення безпеки логістики. Використання цифрових технологій, таких як штучний інтелект, великі дані та Інтернет речей, дозволяє ефективно прогнозувати ризики, оптимізувати маршрути та автоматизувати управлінські процеси. Доведено, що IoT забезпечує моніторинг у реальному часі, Big Data аналізує ризики, а ШІ підвищує точність прогнозування та ухвалення рішень. Інтеграція цих технологій сприяє адаптації логістичних систем до кризових ситуацій.

Водночас існують виклики: високі витрати, потреба в кібербезпеці та складність інтеграції технологій. Подолати їх можна через поступове впровадження, стандартизацію процесів і підвищення контролю якості даних.

Таким чином, впровадження цифрових технологій у міжнародні перевезення підвищує їхню ефективність, гнучкість та стійкість до криз, що є ключовим фактором стабільного розвитку логістики.

#### Список використаних джерел:

1. Baglin C. Response to Extreme Weather Impacts on Transportation Systems. *NCHRP Synthesis of Highway Practice*, 2014. DOI: <https://doi.org/10.17226/22376>
2. Stahl L., Filosa G., Lawless E., & Poe C. Surface Transportation System Resilience to Climate Change and Extreme Weather Events: First International Conference. *Transportation research circular*, 2016.
3. Miao X., Banister D., Tang Y., Li M., & Xi B. Maintaining the transport system under extreme weather events: a dual-network perspective. *Technological and Economic Development of Economy*, 2014, Vol. 19. DOI: <https://doi.org/10.3846/20294913.2013.879748>
4. Testa A., Furtado M., & Alipour A. Resilience of Coastal Transportation Networks Faced with Extreme Climatic Events. *Transportation Research Record*, 2015, Vol. 2532, pp. 29–36. DOI: <https://doi.org/10.3141/2532-04>
5. Sealy K., Hoyle B., & Knowles R. International Air Transport. *Nature*, 1943, Vol. 152, pp. 351–351. DOI: <https://doi.org/10.1038/152351b0>
6. Markolf S., Hoehne C., Fraser A., Chester M., & Underwood B. Transportation resilience to climate change and extreme weather events – Beyond risk and robustness. *Transport Policy*, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1016/J.TRANPOL.2018.11.003>
7. Kaewunruen S., Sussman J., & Matsumoto A. Grand Challenges in Transportation and Transit Systems. *Frontiers in Built Environment*, 2016, Vol. 2, 4. DOI: <https://doi.org/10.3389/fbuil.2016.00004>
8. Doll C., Papanikolaou A., & Maurer H. The vulnerability of transport logistics to extreme weather events. *International Journal of Shipping and Transport Logistics*, 2014, Vol. 6, 293. DOI: <https://doi.org/10.1504/IJSTL.2014.060787>
9. Hao Y., Yin Y., & Lan J. Road Vehicle Classification Based on Extreme Learning Machine. 2013. DOI: <https://doi.org/10.2991/EEIC-13.2013.101>
10. Balakrishnan H. Control and optimization algorithms for air transportation systems. *Annu. Rev. Control.*, 2016, Vol. 41, pp. 39–46. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.arcontrol.2016.04.019>
11. Simkiss D. The International Classification of Functioning Disability and Health. *Journal of tropical pediatrics*, 2007, Vol. 54 pp. 149–50. DOI: <https://doi.org/10.1093/tropej/fmn047>