

Робастна оптимізація транспортно-технологічних схем доставки вантажів в умовах невизначеності

Подригало М. А.¹, Коробко А. І.¹, Абрамов Д. В.¹

¹Харківський національний автомобільно-дорожній університет, Україна

Надійшла: 28.08.2025. Прийнято: 04.12.2025. Опубліковано: 08.12.2025. Відкритий доступ: CC BY 4.0.

Анотація. У статті досліджується проблема підвищення ефективності транспортно-технологічних схем доставки вантажів у міжнародному сполученні в умовах воєнних конфліктів. Розглядається методологія робастної оптимізації з використанням композитної цільової функції, що враховує логістичні витрати, вартість ризику та вартість депривації в умовах епістемічної невизначеності. Результати показують, що запропонований підхід у поєднанні з технологією цифрових двійників дозволяє гарантувати виконання дедлайнів та мінімізувати соціальні збитки навіть за найгірших сценаріїв розвитку подій.

Ключові слова: міжнародні перевезення, логістична схема, оптимізація, витрати, невизначеність, вантаж.

Вступ

Повномасштабне вторгнення російської федерації в Україну у лютому 2022 року спровокувало найбільшу гуманітарну та логістичну кризу в Європі з часів Другої світової війни. Традиційні ланцюги постачання, які функціонували за принципами «Just-in-Time» та мінімізації складських запасів, миттєво втратили свою актуальність та ефективність. Блокада морських портів Чорного моря, через які проходило до 90 % експортно-імпорتنих операцій, змусила переорієнтувати товарні потоки на західні сухопутні кордони з країнами ЄС.

Харків, як один із найбільших індустріальних та наукових центрів Східної Європи, опинився у безпосередній близькості до лінії фронту. Логістичне забезпечення міста та області набуло критичного значення не лише для підтримки економіки, але й для фізичного виживання населення. Специфіка доставки вантажів до Харкова полягає в необхідності подолання значних відстаней від західних кордонів в умовах постійної загрози ракетних обстрілів транспортної інфраструктури, руйнування мостів та нестабільності енергопостачання.

Аналіз поточної ситуації свідчить про те, що класичні методи управління транспортом не здатні адекватно реагувати на виклики воєнного часу. Основною проблемою є стохастична невизначеність, природа якої змінилася з ризикової (де відомі розподіли ймовірностей) на гносеологічну (де знання про майбутні події відсутні або фрагментарні). Звичайні моделі прогнозування попиту та часу доставки, засновані на статистичних вибірках, сформованих у періоди стабільної роботи транспортної мережі, стають нерелевантними, оскільки минулі закономірності не відображають поточних загроз.

Вибір раціональної транспортно-технологічної схеми (ТТС) у міжнародному сполученні – це багатофакторна оптимізаційна задача, що передбачає визначення оптимальної конфігурації транспортних засобів, маршрутів, технологій перевантаження та складських потужностей.

Однак в умовах воєнного стану просте застосування існуючих алгоритмів є недостатнім. Критичною проблемою стає невідповідність класичних цільових функцій, орієнтованих на мінімізацію фінансових витрат, реальним потребам гуманітарної логістики, де пріоритетом є мінімізація соціальних наслід-

ків затримок (вартість депривації) та збереження життя персоналу.

Статичність традиційних моделей робить їх безпорадними перед динамікою змін на лінії фронту. Виникає об'єктивна необхідність у розробці адаптивного математичного апарату, здатного інтегрувати методи робастної оптимізації для гарантування надійності ланцюга постачання в умовах невизначеності з технологіями цифрових двійників для оперативної корекції маршрутів у реальному часі.

Аналіз публікацій

Сучасна світова економіка функціонує в умовах, які характеризуються високим рівнем волатильності, невизначеності, складності та неоднозначності. Якщо на початку ХХІ століття основним критерієм вибору ТТС була мінімізація вартості при дотриманні нормативного терміну доставки (Just-in-Time), то події останніх років докорінно змінили пріоритети. Пандемія COVID-19, блокування Суецького каналу, а згодом – повномасштабна війна в Україні, продемонстрували вразливість глобальних ланцюгів постачання до зовнішніх кризових впливів [1].

Вибір ТТС на поточний момент – це не просто пошук найкоротшого шляху на графі транспортної мережі, а багатовимірна задача оптимізації, що повинна враховувати ймовірність закриття кордонів, коливання фрахтових ставок, доступність контейнерного обладнання та надійність перевізників. Як зазначено в роботі [2], систематичний аналіз обмежень детермінованих моделей вказує на їх неспроможність адекватно реагувати на несподівані події.

Для України питання вибору оптимальної ТТС набуло екзистенційного значення. Блокування чорноморських портів змусило експортерів та логістичних операторів повністю перебудовувати маршрути, орієнтуючись на західні сухопутні переходи та порти Дунаю. Це призвело до виникнення нових типів невизначеності – непередбачувані черги на кордонах, дефіцит рухомого складу на європейській колії, зміни в транзитних процедурах країн ЄС [3].

Вітчизняні науковці акцентують увагу на тому, що в умовах воєнних дій логістична система має трансформуватися з орієнтації на ефективність до орієнтації на виживання та стійкість [4]. Це вимагає впровадження нових інструментів підтримки прийняття рі-

шень, які б базувалися не на історичних даних (які часто втратили актуальність), а на моделюванні сценаріїв в реальному часі.

ТТС міжнародної доставки вантажів є складним комплексом, що об'єднує фізичні потоки (вантаж, транспортні засоби), інформаційні потоки (дані про стан вантажу, документи) та фінансові потоки (оплата фрахту, митні платежі). Згідно з дослідженнями [5], ефективність ТТС визначається не лише технічними параметрами транспортних засобів, але й узгодженістю взаємодії всіх учасників процесу перевезення – від вантажовідправника до кінцевого отримувача, включаючи експедиторів, термінальних операторів та митні органи.

Традиційно вибір ТТС включає наступні етапи:

- вибір виду транспорту. Автомобільний, залізничний, водний, авіаційний або їх комбінація (мультимодальні перевезення);
- маршрутизація. Визначення конкретної послідовності проходження пунктів транспортної мережі;
- вибір логістичних посередників. Перевізники, 3PL-оператори, митні брокери;
- вибір технології вантажообробки. Контейнеризація, пакування, використання спеціалізованого обладнання.

Однак, як зазначено в роботі [6], в сучасних умовах до цього переліку необхідно додати етап оцінки надійності та ризиків. Автори пропонують розглядати надійність транспортного сервісу як комплексну величину, що залежить від часу реакції системи на збурення та часу затримок.

Українські дослідники підкреслюють, що в умовах цифрової економіки окремим фактором невизначеності стає динамічність технологічних інновацій, що вимагає постійного моніторингу та адаптації логістичних систем [7]. Відсутність точної інформації про стан інфраструктури в умовах війни переводить задачу вибору ТТС з площини стохастичного програмування в площину робастної оптимізації, де рішення має бути прийнятним для найгіршого сценарію.

Протягом тривалого часу основою логістичного планування були детерміновані моделі, які базуються на припущенні, що всі параметри системи (попит, час, вартість) є відомими та сталими. Прикладом таких моделей є класична транспортна задача лінійного програмування або задача комівояжера у її базовій постановці.

В роботі [8] зазначено, що детерміновані моделі, які ігнорують стохастичну природу попиту, призводять до створення планів, які є оптимальними лише на папері. У реальності будь-яке відхилення від планових показників (наприклад, затримка судна на 2 дні) руйнує весь ланцюг постачання, оскільки в моделі не передбачено буферів надійності. Автор в роботі [9] підтверджує, що традиційні підходи демонструють найбільш значну деградацію продуктивності в умовах збурень.

Зокрема, дослідження [10] вказує, що хоча детерміновані моделі є обчислювально простішими, вони не здатні забезпечити необхідний рівень стійкості. Наприклад, при проектуванні мережі постачання кисневих концентраторів, ігнорування невизначеності попиту призводило до критичних дефіцитів у пікові періоди, що є неприпустимим для життєво важливих товарів.

Намагаючись подолати недоліки детермінізму, науковці використовують стохастичне програмування. Цей підхід розглядає параметри як випадкові величини з відомими функціями розподілу. Найпоширенішим методом є двохетапне стохастичне програмування, де на першому етапі приймаються стратегічні рішення (наприклад, вибір складів), а на другому – операційні рішення (маршрутизація) коригуються залежно від реалізації випадкової події [11].

В своїй роботі [12], дослідники використали стохастичне моделювання для оптимізації гуманітарної логістики, враховуючи невизначеність попиту та маршрутів евакуації. Запропоновані моделі дозволяють мінімізувати очікувані витрати та незадоволений попит. Проте, стохастичні моделі мають суттєві обмеження:

- залежність від якості даних. Для коректної роботи моделі необхідно мати точні статистичні дані для побудови розподілів ймовірностей. В умовах унікальних подій (війна) такі дані відсутні або нерепрезентативні;
- проблема експоненційної комбінаторної складності. Врахування великої кількості сценаріїв призводить до експоненціального зростання обчислювальної складності задачі, що робить її непридатною для оперативного прийняття рішень.

Враховуючи обмеження стохастичного програмування, сучасна наука схиляється до використання робастної оптимізації (Robust Optimization, RO). На відміну від стохастич-

них моделей, RO не вимагає точних розподілів ймовірностей. Замість цього вона оперує «множинами невизначеності» – інтервалами, в межах яких можуть варіюватися параметри. Мета RO – знайти рішення, яке буде допустимим та ефективним для будь-якої реалізації параметрів у межах цих множин, часто орієнтуючись на найгірший сценарій [13]. Дослідження показують, що робастні моделі забезпечують вищу надійність виконання контрактів. Порівняння традиційної та робастної оптимізації для ланцюга постачання швидкопсувної продукції показало, що робастний підхід дозволяє уникнути дефіциту компонентів, який був неминучим при використанні класичних методів.

Одним із ключових інструментів підвищення робастності та керованості логістичних систем у сучасних умовах є впровадження технології цифрових двійників. Цифровий двійник – це віртуальна репрезентація фізичного об'єкта або процесу, яка оновлюється в реальному часі за допомогою даних з датчиків, IoT-пристроїв та інформаційних систем. У контексті вибору ТТС, цифровий двійник ланцюга постачання дозволяє моделювати рух вантажів, стан інфраструктури та завантаженість терміналів, створюючи динамічну карту логістичної мережі [14].

Аналіз літератури свідчить про стрімке зростання інтересу до цифрових двійників. Ринок цифрових двійників у ланцюгах постачання прогнозовано зросте до 8,7 млрд доларів США до 2033 року [15]. Ключова відмінність цифрових двійників від традиційного імітаційного моделювання полягає у двосторонньому зв'язку. Цифровий двійник не лише отримує дані від фізичної системи, але й може надсилати керуючі впливи або рекомендації назад у систему.

Поєднання робастної оптимізації та цифрових двійників створює потужний інструмент для управління невизначеністю. Робастна оптимізація забезпечує стратегічну стійкість, розраховуючи параметри системи (рівні запасів, пропускну здатність) з урахуванням найгірших сценаріїв. Цифровий двійник забезпечує тактичну гнучкість, постійно оновлюючи параметри множини невизначеності на основі реальних даних.

В дослідженні [16] автори демонструють застосування гібридних алгоритмів – генетичний алгоритм, імітація відпалу та глибоке Q-навчання для оптимізації розподілу вантажопотоків у портових системах. Це особливо

актуально для українських дунайських портів, які зіткнулися з надмірним навантаженням. Використання таких алгоритмів дозволяє балансувати навантаження між різними видами транспорту в режимі реального часу, зменшуючи затори та екологічний вплив.

Мета та постановка задачі

Метою роботи є підвищення ефективності функціонування ТТС доставки вантажів у міжнародному сполученні в умовах воєнних конфліктів шляхом розробки методології робастної оптимізації, яка, на відміну від класичних підходів, мінімізує сукупні соціальні витрати та враховує епістемічну невизначеність параметрів логістичної мережі.

Для досягнення поставленої мети у роботі необхідно вирішити наступний комплекс задач:

- розробити математичну модель вибору раціональної ТТС, що базується на композитній цільовій функції, яка інтегрує три ключові компоненти – логістичні витрати (прямі фінансові витрати на транспортування та перевалку), вартість депривації (економічна оцінка гуманітарних наслідків затримки доставки критичних вантажів), вартість ризику (кількісна оцінка загрози втрати вантажу або життя персоналу на небезпечних ділянках маршруту);
- сформулювати систему робастних обмежень для часових вікон доставки, що дозволить гарантувати виконання дедлайнів навіть за умов реалізації найгірших сценаріїв затримок на маршруті;
- розробити механізм динамічної адаптації параметрів моделі (номінального часу руху, допустимих відхилень, доступності дуг графа) на основі даних, отриманих від цифрового двійника транспортної мережі в режимі реального часу.

Об'єктом дослідження є процеси доставки вантажів у міжнародних логістичних системах в умовах високого рівня невизначеності та ризиків.

Предметом дослідження є методи та моделі оптимізації транспортно-технологічних схем з урахуванням критеріїв соціальної ефективності та безпеки.

Методологічне обґрунтування робастної оптимізації

Традиційні ланцюги постачання, побудовані на принципах «Just-in-Time» та мінімізації

складських запасів, виявилися нежиттєздатними в умовах, коли час транзиту може зрости на порядок через блокування кордонів або руйнування мостової інфраструктури. Критичним викликом для моделювання є природа невизначеності. У мирний час логістика оперує ризиковою невизначеністю, де на основі статистичних даних можна побудувати розподіли ймовірностей. В умовах війни стикаємося з глибокою невизначеністю.

Статистичні дані за попередні роки або навіть місяці стають нерелевантними через динамічну зміну лінії фронту, тактику обстрілів та політичні фактори. Класичне стохастичне програмування, яке мінімізує математичне очікування витрат, в таких умовах є небезпечним. Оптимізація номінального сценарію може призвести до катастрофічних наслідків у випадку реалізації найгіршого сценарію, який у воєнний час має значно вищу ймовірність, ніж у мирний. Тому методологічною основою даного дослідження обрано робастну оптимізацію, яка дозволяє знайти рішення, що залишається допустимим та ефективним для будь-якої реалізації параметрів у межах заданої множини невизначеності.

Класичні моделі вибору ТТС доставки вантажів у міжнародному сполученні мінімізують суму транспортних витрат. У гуманітарній логістиці, особливо в умовах війни, це є недостатнім. Запропонована модель використовує композитну цільову функцію, яка мінімізує сукупні соціальні витрати. Цільова функція B складається з трьох зважених компонентів:

$$B = w_l \cdot B_l + w_c \cdot B_d + w_p \cdot B_p \rightarrow \min, \quad (1)$$

де w_l , w_c , w_p – вагові коефіцієнти, що задаються відповідно до обраної стратегії гуманітарної місії. У ситуаціях, коли існує реальна загроза життю, значення коефіцієнтів w_c та w_p істотно перевищують w_l , оскільки пріоритет надається соціальним потребам та мінімізації ризиків, а не логістичній ефективності; B_l – логістичні витрати, грн; B_d – вартість депривації, грн; B_p – вартість ризику, грн.

Логістичні витрати включають витрати на транспортування та обробку вантажів:

$$B_{\text{л}} = \sum_{k \in K} \sum_{(i,j) \in E} \sum_{m \in M} c_{ij}^m x_{ij}^{km} + \sum_{i \in B_{\text{транс}}} \sum_{k \in K} B_i Q_i^k, \quad (2)$$

де x_{ij}^{km} – бінарна змінна рішення, що набуває значення 1, якщо транспортний засіб, який перевозить вантаж k , проходить дугу (i,j) у модальності m ; у протилежному випадку – 0; B_i – вартість перевантаження у транзитному хабі i , грн.; Q_i^k – обсяг вантажу, що перевантажується, т.

Вартість депривації являє собою ключову інновацію для гуманітарних моделей. Вартість депривації відображає гуманітарний збиток населення через відсутність доступу до товарів першої необхідності. Ця функція є нелінійною (експоненційною) відносно часу затримки.

Функція депривації для критично важливих вантажів розраховується як:

$$D(T_i^k) = \exp(\lambda_k (T_i^k - L_i)) - 1, \quad \text{при } T_i^k > L_i, \quad (3)$$

де T_i^k – фактичний час доставки вантажу k у пункт призначення i , год.; L_i – гранично допустимий час доставки вантажу, год.; λ_k – коефіцієнт «чутливості» депривації до запізнення.

В умовах гуманітарної логістики, на відміну від суворих виробничих графіків, доцільно використовувати концепцію «м'якого часового вікна». Під цим терміном розуміється часовий інтервал, прибуття транспортного засобу в межах якого вважається своєчасним і не тягне за собою жодних штрафних санкцій або негативних соціальних наслідків. Для збереження лінійності моделі використовуємо кусково-лінійну апроксимацію або штрафну функцію для порушення «м'яких вікон»:

$$B_{\text{л}} = \sum_{i \in B_{\text{деп}}} \sum_{k \in K} \left(B_{\text{шп}} \max(0, a_i - T_i^k) + B_{\text{шз}} \max(0, T_i^k - b_i) \right), \quad (4)$$

де a_i, b_i – межі дозволеного інтервалу доставки (м'яке часове вікно), год.; $B_{\text{шп}}$ – штраф за надто ранню доставку, грн/год.; $B_{\text{шз}}$ – штраф

за запізнення, грн/год.

Вартість ризику включає оцінку небезпеки для персоналу та вантажу. В умовах війни екологічні фактори свідомо виключаються, оскільки пріоритетом є виживання, та розраховується за формулою:

$$B_{\text{р}} = \sum_{k \in K} \sum_{(i,j) \in E} \sum_{m \in M} (\rho_{ij}^m \cdot V_k) \cdot x_{ij}^{km}, \quad (5)$$

де ρ_{ij}^m – ймовірність інциденту або повної (часткової) втрати вантажу на дузі (i,j) ; V_k – цінність вантажу k , грн.

Для гарантування правильного функціонування ТТС вводиться система обмежень, яка забезпечує зв'язність маршрутів, задоволення попиту та дотримання вантажопідйомності транспортних засобів. Кожен транспортний засіб, що входить у вузол, повинен також із нього вийти (за винятком вузлів походження та завершення маршруту). Це гарантує відсутність незавершених маршрутів:

$$\sum_{j \in V} \sum_{m \in M} x_{ij}^{km} - \sum_{j \in V} \sum_{m \in M} x_{ji}^{km} = 0, \quad \forall i \in V \setminus \{V_n, V_k\}, \forall k, \quad (6)$$

Кожен пункт призначення повинен бути відвіданий рівно один раз. Це забезпечує виконання гуманітарного або логістичного завдання:

$$\sum_{j \in V} \sum_{m \in M} x_{ij}^{km} = 1, \quad \forall i \in V_m. \quad (7)$$

Сумарний обсяг вантажу, що перевозиться транспортним засобом, не може перевищувати його максимально допустиму вантажопідйомність Q^m . Це фізичне обмеження транспортного засобу, яке гарантує виконання перевезення без перевантаження:

$$\sum_{i \in V_m} d_i \sum_{j \in V} x_{ij}^{km} \leq Q^m, \quad \forall m. \quad (8)$$

Час прибуття транспортного засобу у вузол j , позначений як T_j , залежить від часу прибуття у попередній вузол T_i , часу обслуговування у вузлі s_i , часу руху між вузлами. У детермінованому випадку час поїздки між вузлами задається як t_{ij} . Тоді базове обмеження має вигляд:

$$T_j \geq T_i + s_i + t_{ij} - M \cdot (1 - x_{ij}), \quad (9)$$

де M – велике число, що деактивує обмеження, якщо дуга (i, j) не використовується.

У реальних умовах (особливо під час війни або на територіях з підвищеним ризиком) час у дорозі є випадковою величиною. Тому замість детермінованого значення використовуємо інтервал невизначеності:

$$\tilde{t}_{ij} \in [\bar{t}_{ij}, \bar{t}_{ij} + \hat{t}_{ij}], \quad (10)$$

де $\bar{t}_{ij}$ – номінальний (очікуваний) час руху, год.; $\hat{t}_{ij}$ – максимально можлива додаткова затримка, год.

Щоб гарантувати виконання часових обмежень за будь-якої допустимої реалізації затримок, вводимо бюджет невизначеності Γ , який визначає, скільки дуг маршруту можуть одночасно мати максимальні затримки. Робастне обмеження набуває вигляду:

$$T_j \geq T_i + s_i + \bar{t}_{ij} + \beta_{ij}(x, \Gamma) - M \cdot (1 - x_{ij}), \quad (11)$$

де $\beta_{ij}(x, \Gamma)$ – робастний буфер, що компенсує можливі затримки при русі, год., він залежить від структури маршруту, вибраних дуг x_{ij} , рівня захисту Γ .

Робастна модель вимагає, щоб сумарний час руху на маршруті залишався меншим за дедлайн D навіть за найнесприятливішої (у межах Γ) комбінації затримок:

$$\sum_{(i,j) \in \text{Path}} \bar{t}_{ij} x_{ij} + \max_{\substack{S \subseteq E \\ |S| \leq \Gamma}} \sum_{(i,j) \in S} \hat{t}_{ij} x_{ij} \leq D. \quad (12)$$

Основне обмеження часу з буфером визначається як:

$$T_j + M \cdot (1 - x_{ij}) \geq T_i + s_i + \bar{t}_{ij} + \left(\Gamma z_j + \sum_{(u,v) \in E} p_{uvj} \right). \quad (13)$$

Двоїсті (лінійні) обмеження визначаються як:

$$\begin{aligned} z_j + p_{ij} &\geq \hat{t}_{ij} x_{ij}, & \forall (i, j) \in E \\ z_j &\geq 0, & p_{ij} \geq 0 \end{aligned} \quad (14)$$

Змінна z_j представляє, наскільки збільшується «страховий запас часу» при використанні одиниці бюджету невизначеності Γ , p_{ij} поглинає частину затримки на дузі (i, j) коли значення $\hat{t}_{ij}$ перевищує внесок змінної z_j . У контексті робастної оптимізації критично важливим є поняття «страхового запасу часу». Це додатковий резерв часу, який модель автоматично додає до номінальної тривалості маршруту для компенсації можливих затримок, викликаних епістемічною невизначеністю (блокування, обстріли, ремонти). Робастний буфер визначає мінімальний необхідний запас часу, який гарантує виконання дедлайну в найгіршому сценарії, коли затримки виникають не більше ніж на Γ дугах:

$$\Gamma z_j + \sum_{(u,v) \in E} p_{uvj}. \quad (15)$$

Інтеграція умови (15) у модель гарантує, що знайдений маршрут залишатиметься допустимим навіть за умови реалізації найгіршого сценарію затримок у межах бюджету, що є критичним для мінімізації вартості депривації у цільовій функції (1). Таким чином, величина робастного буфера виступає захисним резервом моделі логістичної системи, вартість якого автоматично балансується моделлю проти ризику зриву поставок життєво необхідних вантажів.

Сценарний аналіз стратегій функціонування

Використання розробленої моделі дозволяє порівняти ефективність стратегій у різних сценаріях. Для всебічного аналізу ефективності роботи ТТС пропонується порівняння чотирьох базових стратегій, що варіюються залежно від розподілу вагових коефіцієнтів цільової функції та заданого рівня невизначеності.

Як базовий варіант розглядається сценарій «Мирний час», де пріоритетом виступає економічна ефективність за умови мінімальних ризиків та відсутності критичного дефіциту товарів. У цьому випадку ваговий коефіцієнт логістичних витрат w_d значно перевищує інші параметри, а бюджет невизначеності Γ дорівнює нулю, що наближає роботу моделі до класичної задачі маршрутизації з мінімізацією сукупних фінансових витрат.

На противагу цьому, сценарій «Гуманітарна криза» відображає ситуацію критичної

потреби у швидкій доставці вантажів першої необхідності, коли вартість перевезення втрачає своє першочергове значення. За таких умов домінує коефіцієнт w_c при високій чутливості до запізнення, що змушує модель обирати найшвидші маршрути для мінімізації вартості депривації, ігноруючи при цьому високі витрати на пальне чи експлуатацію дорожніх видів транспорту.

У ситуаціях, що передбачають транспортування цінних вантажів або рух через зони бойових дій, реалізується сценарій «Високий рівень загрози», де головною метою стає збереження вантажу та життя персоналу. Математично це виражається через домінування вагового коефіцієнта ризику w_p , внаслідок чого маршрути формуються в обхід небезпечних дуг із високою ймовірністю інцидентів, навіть ціною суттєвого збільшення часу доставки та загальних витрат.

Окремої уваги потребує сценарій «Максимальна невизначеність», характерний для умов повної непередбачуваності дорожньої ситуації через блокпости або обстріли. При збалансованих вагових коефіцієнтах, але максимальному бюджеті невизначеності Γ , вмикаються робастні обмеження, які призводять до формування маршрутів зі значними часовими буферами. Це гарантує дотримання дедлайнів навіть за умови реалізації найгірших сценаріїв затримок, дозволяючи особам, що приймають рішення, адаптувати стратегію управління ТТС відповідно до поточної військово-політичної ситуації.

З метою верифікації розробленого методологічного підходу та оцінки ефективності запропонованої робастної моделі проведено

моделювання вибору раціональної ТТС на прикладі фрагмента логістичної мережі сполученням «Західний кордон – Харків». Експеримент спрямовано на порівняльний аналіз стійкості рішень, отриманих при варіюванні вагових коефіцієнтів цільової функції та бюджету невизначеності. Як модельний полігон розглянуто дві альтернативні траєкторії доставки:

- маршрут А (умовно-оптимальний), характеризується мінімальною довжиною та низькою базовою вартістю, проте проходить через вузли з високою ймовірністю виникнення інцидентів;
- маршрут Б (альтернативний), характеризується більшою протяжністю та вищими логістичними витратами, однак має низький рівень стохастичної невизначеності параметрів (табл.1).

Таблиця 1. Параметри альтернативних маршрутів

Характеристика	Маршрут А	Маршрут Б
Номінальний час руху, год	15	20
Максимальна можлива затримка, год	12	3
Логістичні витрати, \$	1000	1400
Гранично допустимий час доставки вантажу, год	24	24

Моделювання виконано для трьох базових стратегій функціонування ТТС, описаних у теоретичній частині роботи. Результати розрахунків наведено у таблиці 2.

Таблиця 2. Результати порівняльного аналізу стратегій вибору ТТС

Показник	Сценарій 1 – «Мирний час»	Сценарій 2 – «Гуманітарна криза»	Сценарій 3 – «Максимальна невизначеність»
Цільова функція	Мінімізація витрат ($w_d \rightarrow \max$)	Мінімізація часу/депривації ($w_c \rightarrow \max$)	Робастна стійкість ($\Gamma > 0$)
Обраний маршрут	Маршрут А	Маршрут А	Маршрут Б
Розрахункові витрати	1000 \$ (min)	1000 \$	1400 \$ (+40%)
Прогноз часу (оптимістичний)	15 год	15 год	20 год
Фактичний час (найгірший сценарій)	27 год	27 год	23 год
Результат виконання гуманітарної доставки	Гранично допустимий час доставки вантажу зірвано (>24 год). Критичне зростання вартості депривації	Гранично допустимий час доставки вантажу зірвано. Гуманітарна катастрофа через затримку	Гранично допустимий час доставки вантажу дотримано. Гарантована доставка вантажу

Інтеграція з технологією цифрових двійників

Практична імплементація запропонованої робастної моделі вимагає виходу за межі статичного планування та створення системи управління на базі технології цифрових двійників.

Математична модель у цьому контурі виступає аналітичним ядром, тоді як цифровий двійник забезпечує безперервний двосторонній потік даних між фізичними активами транспортної мережі та їх віртуальними репрезентаціями. Такий підхід дозволяє трансформувати розроблену систему обмежень з інструменту попереднього розрахунку в механізм оперативного реагування, що функціонує в режимі ковзного горизонту планування.

Функціонування системи базується на безперервній агрегації та обробці гетерогенних потоків даних, які надходять від бортових телеметричних систем GPS-трекінгу, API-інтерфейсів прикордонних та митних служб, а також систем оповіщення про повітряну небезпеку.

У процесі синхронізації цифрового двійника з реальною ситуацією відбувається динамічне оновлення параметрів зваженого графа мережі. Зокрема, номінальний час проходження дуги $\hat{t}_{ij}$ коригується на основі поточної статистики трафіку, тоді як параметр максимального відхилення $\hat{t}_{ij}$ перераховується з урахуванням повідомлень про блокування інфраструктури або черги на пунктах пропуску. Одночасно, у разі фізичного знищення або блокування транспортних вузлів, відповідні бінарні змінні доступності дуг примусово набувають нульового значення, змінюючи топологію доступної мережі.

Ключовим елементом запропонованої архітектури є тригерний механізм перерахунку маршрутів. Система не просто відслідковує рух транспортних засобів, а постійно перевіряє виконання робастних обмежень для поточних значень параметрів. Якщо прогнозований час прибуття у цільовий вузол з урахуванням оновлених затримок перевищує допустиме часове вікно, алгоритм ініціює нову ітерацію пошуку оптимального рішення. Це дозволяє генерувати альтернативні маршрути ще до моменту фактичного настання критичної затримки, забезпечуючи адаптивність ланцюга постачання в умовах високої волатильності безпекового середовища та мінімізуючи ризики для гуманітарних місій.

Висновки

Визначено, що в умовах активних бойових дій застосування класичних детермінованих та стохастичних моделей є неефективним через наявність епістемічної невизначеності, коли статистичні дані втрачають репрезентативність.

Обґрунтовано доцільність використання методів робастної оптимізації, яка дозволяє знаходити рішення, стійкі до найгірших сценаріїв розвитку подій, на відміну від оптимізації «середнього» результату.

Розроблено математичну модель вибору раціональної ТТС, ключовою відмінністю якої є використання композитної цільової функції мінімізації сукупних соціальних витрат. На відміну від комерційних моделей, запропонована функція інтегрує три складові – логістичні витрати, вартість ризику (безпека персоналу та вантажу) та вартість депривації (соціальна ціна затримки доставки критичних вантажів).

Сформульовано систему робастних обмежень із використанням бюджету невизначеності. Це дозволило математично формалізувати гарантію дотримання дедлайнів доставки навіть за умов виникнення максимальних затримок на визначеній кількості ділянок маршруту, що забезпечує надійність функціонування гуманітарних коридорів.

Проведене моделювання базових стратегій («Мирний час», «Гуманітарна криза», «Високий рівень загрози», «Максимальна невизначеність») показало, що зміна вагових коефіцієнтів моделі дозволяє адаптувати логістичну систему до поточних пріоритетів – від мінімізації витрат до максимізації безпеки або швидкості доставки, ігноруючи економічні чинники у критичних ситуаціях.

Запропоновано концепцію динамічного управління ТТС шляхом інтеграції розробленої робастної моделі з технологією цифрових двійників. Це забезпечує можливість оперативного перерахунку маршрутів у режимі реального часу на основі даних про зміни трафіку, блокування інфраструктури або воєнні загрози, трансформуючи статичний план у гнучкий механізм реагування.

Конфлікт інтересів

Автори заявляють, що немає конфлікту інтересів щодо публікації цієї статті.

Література

1. Polo, A., Morillo-Torres, D., & Escobar, J. W. (2025). Toward Adaptive and Immune-Inspired Viable Supply Chains: A PRISMA Systematic Review of Mathematical Modeling Trends. *Mathematics*, 13(14), 2225. <https://doi.org/10.3390/math13142225>.
2. Li, R. (2025). Optimisation of cross border export e-commerce supply chain network based on machine learning and random programming. *International Journal of Information and Communication Technology*, 26(28), 84–102. <https://doi.org/10.1504/ijict.2025.147712>.
3. Marchenko, V. (2025). Main challenges on the way of implementing «green» technologies in the logistics sphere. *Electronic Scientific Journal Intellectualization of Logistics and Supply Chain Management* #1 2020, 33, 43–55. <https://doi.org/10.46783/smart-scm/2025-33-3>.
4. Grytsenko, S., & Hallini, I. (2025). Modeling sustainable supply chains for ukraine's export-oriented industries. *Electronic Scientific Journal Intellectualization of Logistics and Supply Chain Management* #1 2020, 1(31), 46–54. <https://doi.org/10.46783/smart-scm/2025-31-4>.
5. Pencheva, V., Asenov, A., Sladkowski, A., Ivanov, B., & Georgiev, I. (2022). Current Issues of Multimodal and Intermodal Cargo Transportation. *У Modern Trends and Research in Intermodal Transportation* (с. 51–124). Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-030-87120-8_2.
6. Vojtov, V., Berezchnaja, N., Kravcov, A., & Volkova, T. (2018). Evaluation of the Reliability of Transport Service of Logistics Chains. *International Journal of Engineering & Technology*, 7(4.3), 270. <https://doi.org/10.14419/ijet.v7i4.3.19802>.
7. Почтовіук, А. Б., Хоменко, М. М., Семеніхіна, В. В., & Заїка, К. О. (2022). Функціонування логістичних інформаційних систем в умовах діджиталізації. *Pochtoviuk, A. B., Khomenko, M. M., Semenikhina, V. V., & Zaika, K. O. (2022). Funktsionuvannia lohistychnykh informatsiynykh system v umovakh didzhytalizatsii. [Functioning of logistic information systems under digitalization conditions] Efektyvna ekonomika*, (11). <https://doi.org/10.32702/2307-2105.2022.11.2>. [in Ukrainian].
8. Science, J. o. S. C. M. (2015). A Review of Supply Chain Data Mining Publications. *Journal of Supply Chain Management Science*. <https://doi.org/10.18757/jscms.2015.955>.
9. Lu Y. (2025). A multimodal deep reinforcement learning approach for IoT-driven adaptive scheduling and robustness optimization in global logistics networks. *Scientific reports*, 15(1), 25195. <https://doi.org/10.1038/s41598-025-10512-1>.
10. Faggioni, F., & Rossi, M. V. (2025). Resilience: A New Need for Global Supply and Value Chain Networks. *У Network Design, Redesign and Supply Chain Resilience* (с. 1–24). Springer Nature Switzerland. https://doi.org/10.1007/978-3-032-03203-4_1.
11. Siddig, M., & Song, Y. (2024). Multistage stochastic programming with a random number of stages: Applications in hurricane disaster relief logistics planning. *European Journal of Operational Research*. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2024.10.004>.
12. Heng, S., Phutthanawong, K., & Boonmee, C. (2025). Optimizing localized humanitarian logistics: a stochastic programming approach for facility location, inventory and evacuation strategies. *Journal of Humanitarian Logistics and Supply Chain Management*. <https://doi.org/10.1108/jhlscm-02-2025-0020>.
13. Wu, Y., Zhang, J., Li, Q., & Tan, H. (2023). Research on Real-Time Robust Optimization of Perishable Supply-Chain Systems Based on Digital Twins. *Sensors*, 23(4), 1850. <https://doi.org/10.3390/s23041850>.
14. Li, S., Jin, P., Su, S., Yao, J., & Pang, Q. (2025). Digital Twins and Cross-Border Logistics Systems Risk Management Capability: An Innovation Diffusion Perspective. *Systems*, 13(8), 658. <https://doi.org/10.3390/systems13080658>.
15. Zaidi, S. A. H., Khan, S. A., & Chaabane, A. (2024). Unlocking the Potential of Digital Twins in Supply Chains: A Systematic Review. *Supply Chain Analytics*, 100075. <https://doi.org/10.1016/j.sca.2024.100075>.
16. Sun, M., Liang, C., Wang, Y., & Biancardo, S. A. (2025). Maritime Port Freight Flow Optimization with Underground Container Logistics Systems Under Demand Uncertainty. *Journal of Marine Science and Engineering*, 13(6), 1173. <https://doi.org/10.3390/jmse13061173>.

Подригало Михайло¹, д.т.н., проф., завідувач каф. технології машинобудування і ремонту машин, тел. +38 0503011658, e-mail pmikhab@gmail.com, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1624-5219>

Коробко Андрій¹, д.т.н., проф., каф. технології машинобудування і ремонту машин, тел. +38 0668333443, e-mail ak82andrey@gmail.com, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6618-7790>

Абрамов Дмитрій¹, д.т.н., проф., каф. технології машинобудування і ремонту машин, тел. +38 0951294293, e-mail varan_mail@ukr.net, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1846-1991>

¹Харківський національний автомобільно-дорожній університет, 61002, Україна, м. Харків, вул. Ярослава Мудрого, 25.

Robust optimization of transport-technological schemes for cargo delivery under uncertainty

Abstract. Problem. The full-scale military aggression against Ukraine has fundamentally altered the architecture of logistics systems, rendering traditional «Just-in-Time» supply chain models ineffective. The blockade of Black Sea ports and the constant threat of shelling have forced a strategic shift of cargo flows to western land borders. This environment is characterized not by risk (stochastic uncertainty with known probabilities), but by epistemic (deep) uncertainty, where historical data becomes irrelevant. Consequently, classic deterministic and stochastic models, which focus on minimizing financial costs, are inadequate for humanitarian logistics, where the priority lies in minimizing social consequences and ensuring the physical survival of the population. **Goal.** The primary objective of this study is to enhance the efficiency and reliability of transport-technological schemes (TTS) for international cargo delivery in conditions of military conflict. This is achieved by developing a robust optimization methodology that, unlike classical approaches, minimizes total social costs and effectively accounts for the epistemic uncertainty of logistics network parameters. **Methodology.** The research methodology is based on robust optimization (RO) principles, which utilize «uncertainty sets» rather than probability distributions. The study develops a mathematical model centered on a composite objective function that integrates three key components: direct logistics costs, the cost of risk (threats to cargo and personnel), and the cost of deprivation (a non-linear economic valuation of the humanitarian impact caused by delivery delays). To handle time uncertainty, the authors formulate robust constraints using the concept of an «uncertainty budget» and propose a mechanism for dynamic parameter adaptation using Digital Twin technology. **Results.** A new mathematical model for selecting rational TTS has been developed. Unlike commercial models, the proposed function prioritizes social needs over financial economy in critical situations. The study successfully formulated a system of robust constraints that guarantees the adherence to delivery deadlines (Hard Time Windows) even under the realization of worst-case delay scenarios on a specified number of route segments. Scenario analysis of four strategies («Peace», «Humanitarian Cri-

sis», «High Threat», «Maximum Uncertainty») demonstrated that adjusting the model's weight coefficients allows for the adaptation of the logistics system to current priorities—ranging from cost minimization to the maximization of safety or speed, regardless of economic factors. **Originality.** The scientific novelty lies in the integration of the deprivation cost function into a robust routing model specifically designed for conditions of epistemic uncertainty characteristic of wartime. The authors substantiate the shift from the paradigm of minimizing expected costs (stochastic approach) to minimizing costs in the worst-case scenario (robust approach) for critical humanitarian cargo. **Practical value.** The practical significance of the work involves the proposed concept of dynamic TTS management through the integration of the robust model with Digital Twin technology. This architecture enables operational route re-calculation in real-time based on heterogeneous data regarding traffic, infrastructure destruction, or military threats. This transforms static plans into flexible response mechanisms, ensuring the reliability of humanitarian corridors and the security of supply chains in highly volatile environments.

Key words: international transportation, logistics scheme, optimization, costs, uncertainty, cargo.

Podryhalo Mikhail¹, professor, Doct. of Science, Head of Mechanical Engineering Technology and Machine Repair Department, tel. +38 0503011658, e-mail: pmikhab@gmail.com, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1624-5219>

Korobko Andrii¹, professor, Doct. of Science, Mechanical Engineering Technology and Machine Repair Department, tel. +38 0668333443, e-mail: ak82andrey@gmail.com, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6618-7790>

Abramov Dmytrii¹, professor, Doct. of Science, Mechanical Engineering Technology and Machine Repair Department, tel. +38 0951294293, e-mail: varan_mail@ukr.net, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1846-1991>

¹Kharkov National Automobile and Highway University, 25, Yaroslava Mudrogo str., Kharkiv, 61002, Ukraine.