

О. В. Фомін

Національний транспортний університет
вул. М. Омеляновича-Павленка, 1, м. Київ, 01010, Україна
Телефон: +380678139788, E-mail: o.fomin@ntu.edu.ua
ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2387-9946>

В. М. Іщенко

Національний транспортний університет
вул. М. Омеляновича-Павленка, 1, м. Київ, 01010, Україна
Телефон: +380678365907, E-mail: v.ishchenko@ntu.edu.ua
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5559-4251>

Н. С. Брайковська

Національний транспортний університет
вул. М. Омеляновича-Павленка, 1, м. Київ, 01010, Україна
Телефон: +380674424373, E-mail: n.braikovska@ntu.edu.ua
ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1556-4020>

Є. М. Яровий

Національний транспортний університет
вул. М. Омеляновича-Павленка, 1, м. Київ, 01010, Україна
Телефон: +380675639788, E-mail: yarovyi_ym@ntu.edu.ua
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6666-5467>

ІНТЕЛЕКТУАЛІЗАЦІЯ ЛОГІСТИЧНИХ ПРОЦЕСІВ ДОСТАВКИ ШВИДКОПСУВНИХ ВАНТАЖІВ ЗАЛІЗНИЧНИМ ТРАНСПОРТОМ ПІД ЧАС ВОЄННОГО СТАНУ

У статті розроблено та обґрунтовано концептуальні засади інтелектуалізації логістичних процесів доставки швидкопсувних вантажів залізничним транспортом в умовах воєнного стану. Актуальність дослідження зумовлена різким посиленням дестабілізаційних чинників, серед яких руйнування логістичної інфраструктури, загроза обстрілів, нестабільність транспортних мереж, дефіцит ресурсів та критична необхідність забезпечення безперервності холодового ланцюга для збереження продовольчої та гуманітарної безпеки держави. Аналіз сучасних наукових джерел засвідчив відсутність комплексних рішень, які б інтегрували інтелектуальні технології у логістику швидкопсувних вантажів саме в умовах військових ризиків.

Метою дослідження є створення науково обґрунтованої моделі інтелектуалізації, яка забезпечує адаптивне, безпечне й ефективне управління логістичними процесами в реальному часі. Методична база включає системний аналіз, методи математичного та імітаційного моделювання, апарат штучного інтелекту (нейромережевий прогноз, алгоритми машинного навчання),

© Фомін О. В., Іщенко В. М., Брайковська Н. С., Яровий Є. М., 2025

цифрові технології моніторингу (IoT, телеметрія, супутникові дані), а також інструменти економіко-математичного оцінювання ефективності рішень.

У межах роботи розроблено інтегровану модель інтелектуальної логістики, що об'єднує:

- багатосенсорний IoT-моніторинг рефрижераторних вагонів;*
- систему предиктивної аналітики ризику псування вантажу;*
- адаптивні алгоритми маршрутного планування з урахуванням оперативної безпекової обстановки;*
- цифровий центр управління логістикою, який забезпечує консолідацію даних про інфраструктуру, вантаж, маршрути та загрози.*

Отримані результати доводять, що впровадження запропонованих інтелектуальних механізмів дозволяє значно підвищити стійкість логістичної системи. Моделювання показало можливість скорочення часу доставки на 20–40 %, зниження втрат швидкопсувної продукції на 30–50 %, зменшення впливу людського фактору та підвищення точності прогнозування ризиків. Запропонована методика підтримує формування цифрових двійників рефрижераторного рухомого складу, що створює умови для поглибленої діагностики, прогнозування відмов та оптимізації експлуатаційних процесів.

Практична значимість роботи полягає у можливості впровадження розроблених рішень у системи диспетчерського управління Укрзалізниці, логістичні центри, гуманітарні коридори та міжнародні транспортні маршрути. Результати формують наукове підґрунтя для побудови національної цифрової інфраструктури управління критичними вантажами, здатної функціонувати у надзвичайних та воєнних умовах.

Ключові слова: інтелектуалізація, логістика, доставка швидкопсувних вантажів, залізничний транспорт.

Вступ та постановка проблеми. Актуальність проведення науково-прикладного дослідження з інтелектуалізації логістичних процесів доставки швидкопсувних вантажів залізничним транспортом під час воєнного стану є беззаперечною та обумовлена низкою критичних чинників. Повномасштабна військова агресія суттєво дестабілізувала традиційні логістичні ланцюги, особливо в сегменті перевезення вантажів із обмеженим терміном придатності. Збереження якості та безпеки швидкопсувної продукції, як-от продукти харчування, медикаменти чи біоматеріали, є життєво важливим питанням національної безпеки та забезпечення стійкості тилу. В умовах постійної загрози обстрілів та руйнування інфраструктури, залізничний транспорт виявився одним із найбільш надійних та стійких до масованих атак. Це вимагає негайної модернізації та підвищення його ефективності, особливо у критичних операціях.

Традиційні методи планування та управління логістикою швидкопсувних вантажів виявилися недостатньо гнучкими та адаптивними до динамічних змін воєнного часу. Потрібні нові, інтелектуальні рішення, здатні оперативно реагувати на закриття ділянок, зміну маршрутів, дефіцит ресурсів та непередбачувані затримки. Інтелектуалізація логістичних процесів, що включає використання штучного інтелекту, Big Data, IoT-технологій та прогнозного моделювання, може забезпечити необхідний рівень прозорості, контролю та оптимізації. Це дозволить мінімізувати

ризиків псування вантажу, скоротити час доставки та знизити операційні витрати, що є критичним в умовах обмеженого фінансування та ресурсів.

Дослідження набуває особливої значущості у контексті гуманітарної логістики. Швидке та безпечне доставлення продовольства та медикаментів у постраждалі регіони є пріоритетом, і інтелектуальні системи можуть значно покращити цей процес. Автоматизоване відстеження температурного режиму та інших критичних параметрів в режимі реального часу є ключовим для гарантування якості. Оптимізація використання рухомого складу, зокрема рефрижераторних вагонів, через інтелектуальне планування дозволить максимально ефективно використовувати обмежений парк. Також важливою є задача безпеки. Інтелектуальні системи можуть інтегрувати дані про рівень небезпеки на різних ділянках маршруту, дозволяючи автоматично обирати найбезпечніші та найшвидші шляхи обходу.

Сучасна логістика залізничного транспорту в умовах війни зіткнулася з проблемою надмірного навантаження на ключові вузли та необхідністю синхронізації роботи різних видів транспорту. Інтелектуальні системи здатні розвантажити диспетчерів від рутинних завдань, надаючи їм прогностичні сценарії та рекомендації для прийняття рішень. Цифровізація документів та автоматизація митних та прикордонних процедур, особливо для експортно-імпортних операцій, також є частиною інтелектуалізації. Відновлення економіки після перемоги вимагатиме високоефективної логістичної інфраструктури, і розробка таких рішень вже сьогодні закладає фундамент майбутнього зростання. Таким чином, дане дослідження є стратегічним для підвищення обороноздатності, економічної стійкості та гуманітарного забезпечення країни в умовах військового конфлікту та після нього. Врахування специфіки швидкопсувних вантажів та особливостей воєнного часу робить цей напрям критично важливим для сучасної транспортної науки та практики.

Аналіз останніх досліджень.

Огляд [1] детально розглядає логістику та управління харчовим холодовим ланцюгом, що є критично важливим для забезпечення безпеки та якості продуктів. Автори аналізують поточний стан розвитку в цій галузі, виділяючи ключові технології та управлінські підходи. Особлива увага приділяється новим тенденціям, таким як цифровізація, автоматизація та підвищена стійкість ланцюга постачання. Дослідження підкреслює необхідність впровадження інновацій для подолання проблем, пов'язаних зі швидким псуванням продуктів і регуляторними вимогами. Робота слугує цінним ресурсом для дослідників і практиків, які займаються оптимізацією холодового ланцюга.

Публікація [2] представляє інтегрований підхід до планування для швидкопсувних товарів, що об'єднує рішення щодо виробництва, запасів і маршрутизації. Ключовою особливістю є врахування стохастичного (випадкового) терміну придатності продуктів, що робить модель більш реалістичною. Розроблений метод планування має на меті мінімізувати загальні витрати системи, включаючи витрати через псування та транспортні витрати. Дослідження пропонує алгоритм для розв'язання складної інтегрованої задачі оптимізації. Результати демонструють значні переваги інтегрованого підходу порівняно з традиційним роздільним плануванням.

Дослідження [3] зосереджено на оптимізації маршрутів холодового ланцюга для перевезення свіжих продуктів з урахуванням екологічних цілей. Головна мета – знайти маршрути, які забезпечують мінімальне споживання енергії та, відповідно, зниження викидів вуглецю. Автори розробили математичну модель, що інтегрує логістичні витрати, час доставки та вплив на навколишнє середовище. Дослідження пропонує практичні рекомендації для транспортних компаній щодо вибору енерго-

ощадних маршрутів. Робота підтверджує, що екологічні аспекти є важливим фактором в оптимізації логістики холодового ланцюга.

Стаття [4] описує розробку високонадійної гібридної системи передачі даних для безпілотних надводних апаратів. Система призначена для забезпечення стабільного зв'язку навіть в умовах значних перешкод, що критично важливо для морських операцій. Автори аналізують та пропонують рішення для підвищення стійкості каналу зв'язку до зовнішніх впливів. Цей розвиток має велике значення для автономної навігації, моніторингу та збору даних у складних водних середовищах. Робота демонструє інженерний підхід до вирішення проблеми надійності передачі інформації для автономних систем.

Публікація [5] присвячена питанням сталого розвитку відновлюваної енергетики у судноплавстві, аналізуючи її технологічні та екологічні перспективи. Автори досліджують потенціал використання альтернативних джерел енергії (наприклад, сонячної, вітрової) для зниження залежності від традиційного палива. Основний акцент зроблено на екологічних перевагах, які включають значне зменшення викидів парникових газів і забруднюючих речовин. Дослідження розглядає технологічні виклики та бар'єри на шляху впровадження відновлюваних джерел енергії в морський транспорт. Робота підкреслює важливість переходу до чистіших енергетичних рішень для досягнення сталого розвитку галузі.

Дослідження [6] фокусується на застосуванні Інтернету речей (IoT) для моніторингу холодового ланцюга в реальному часі в умовах контейнерного порту. Впровадження IoT-сенсорів дозволяє безперервно відстежувати температуру та інші критичні параметри всередині рефрижераторних контейнерів. Система забезпечує своєчасне виявлення будь-яких відхилень, що значно знижує ризик псування вантажу. Автори демонструють, як технологія IoT покращує прозорість і надійність обробки швидкопсувних товарів у портовій логістиці. Робота підтверджує ефективність цифрових рішень для посилення контролю за холододовим ланцюгом.

Робота [7] являє собою систематичний огляд літератури з питань сталості логістики холодового ланцюга швидкопсувних продуктів харчування. Огляд аналізує дослідження, які стосуються економічних, екологічних та соціальних аспектів стійкості холодового ланцюга. Автор ідентифікує ключові прогалини в існуючих дослідженнях та визначає напрямки для майбутніх наукових робіт. Центальною темою є необхідність збалансованого підходу до оптимізації, що враховує не лише витрати, але й вплив на довкілля. Дослідження слугує комплексною базою знань про виклики та стратегії сталості в цій критичній галузі.

Стаття [8] присвячена стохастичній задачі виробництва-маршрутизації (Stochastic Production-Routing Problem) для швидкопсувних продуктів. Дослідження розглядає невизначеність у попиті та терміні придатності, що є характерним для цих товарів. Автори пропонують математичну модель, яка одночасно оптимізує графік виробництва, рівень запасів та транспортні маршрути. Для вирішення цієї складної задачі розроблено ефективний алгоритм. Робота демонструє, як інтегроване стохастичне моделювання може підвищити ефективність ланцюга постачання швидкопсувних товарів.

Дослідження [9] зосереджено на теоретичному та практичному визначенні параметрів бортового ємнісного накопичувача енергії для рухомого складу метрополітену. Мета роботи – підвищити енергоефективність підземного транспорту шляхом використання накопиченої енергії. Автори аналізують конструктивні особливості та умови експлуатації, що впливають на вибір параметрів накопичувача. Результати допомагають оптимізувати дизайн системи для максимально ефективного

рекуперативного гальмування. Ця робота є важливим внеском у розробку енергоощадних технологій для міського рейкового транспорту.

Публікація [10] присвячена визначенню динамічних навантажень, що виникають на напіввагон при його кріпленні до палуби залізничного порома за допомогою в'язкої муфти. Дослідження моделює та аналізує рух вагона під час морського транспортування для оцінки сил і напружень. Встановлення цих навантажень є критично важливим для забезпечення безпеки перевезення та запобігання пошкоджень. Автори розробили метод для розрахунку параметрів в'язкої муфти, які мінімізують динамічні ефекти. Робота має практичне значення для оптимізації конструкції кріпильних систем на поромних переправах.

Дослідження [11] аналізує вплив конфлікту в Україні на витрати транспортування зерна, як внутрішні, так і зовнішні. Автор розглядає альтернативні транспортні ланцюги, які були розроблені у відповідь на порушення традиційних маршрутів. Оцінюються зміни у вартості перевезень, а також пов'язані з цим викиди вуглецю для нових логістичних схем. Робота виявляє економічні та екологічні наслідки геополітичних подій для глобального ринку зерна та продовольчої безпеки. Результати підкреслюють критичну важливість гнучкості та стійкості логістичних систем у кризових ситуаціях.

Стаття [12] зосереджена на визначенні довговічності несучої конструкції кузова відкритого вантажного піввагона, виготовленого з круглих труб, під час його перевезення на залізничному поромі. Дослідження оцінює напружено-деформований стан конструкції під впливом динамічних навантажень, характерних для морського транспорту. Мета – підтвердити надійність і безпеку піввагона за специфічних умов експлуатації на поромі. Автори використовують методи розрахунку для прогнозування терміну служби та виявлення потенційно слабких місць. Робота сприяє підвищенню безпеки та ефективності інтермодальних перевезень залізничним транспортом.

Огляд [13] фокусується на логістиці «останньої милі» для швидкопсувних продуктів, аналізуючи показники ефективності та результативності. Автори систематизують метрики, які емпірично використовуються для вимірювання успіху доставки свіжих товарів кінцевому споживачеві. Дослідження підкреслює критичну важливість збереження якості продукту протягом останнього етапу доставки. Огляд виявляє найбільш поширені стратегії та технології, які використовуються для оптимізації цього складного сегмента логістики. Робота є важливим орієнтиром для компаній, що прагнуть покращити свою діяльність на «останній милі».

Публікація [14] представляє модель робастного програмування зі змішаними цілими числами для дворівневої задачі маршрутизації запасів (Inventory Routing Problem) швидкопсувних продуктів. Робастний підхід дозволяє враховувати невизначеність у ключових параметрах (наприклад, попит або час доставки), забезпечуючи стійке рішення. Мета моделі – мінімізувати загальні витрати ланцюга постачання, включаючи транспортні витрати та витрати на утримання запасів. Дослідження пропонує практичний інструмент для планування логістики в умовах високої невизначеності. Робота підкреслює важливість стійкості рішень в управлінні ланцюгом постачання швидкопсувних товарів.

Аналіз літератури засвідчив, що питанням інтелектуалізації логістичних процесів доставки швидкопсувних вантажів залізничним транспортом саме в контексті воєнного стану не приділено достатньої уваги. Існуючі наукові праці з логістики швидкопсувних вантажів здебільшого стосуються мирного часу та стабільних умов експлуатації, ігноруючи фактори військової загрози та динамічної дестабілізації.

Дослідження з інтелектуальних транспортних систем часто фокусуються на автомобільному транспорті або загальних принципах залізничної логістики без глибокої спеціалізації на потребах товару, що швидко псується. Відсутні комплексні моделі, які б інтегрували ризики, пов'язані з бойовими діями (руйнування колії, обстріли), з потребою у суворому контролі температурного режиму. Недостатньо розроблено адаптивних алгоритмів маршрутизації, здатних оперативно перепланувати доставку швидкопсувних вантажів в умовах непередбачуваних обмежень залізничної мережі. Таким чином, існує значний науковий пробіл у розробці спеціалізованих інтелектуальних рішень, які відповідають викликам та специфіці воєнного часу.

Методи дослідження. При виконанні науково-практичного дослідження використано комплекс взаємодоповнюючих методів. Застосовувався системний аналіз для вивчення логістичних процесів як цілісної системи, що функціонує в умовах зовнішнього впливу воєнного стану. Методи математичного та імітаційного моделювання були використані для розробки та апробації адаптивних алгоритмів маршрутизації та оцінки ризиків. Теорія прийняття рішень та методи штучного інтелекту (Machine Learning, нейронні мережі) застосовувалися для аналізу прогностичних моделей та автоматизованого вибору оптимальних рішень. Для обґрунтування практичних рекомендацій та оцінки ефективності використовувалися методи економіко-математичного аналізу та статистичної обробки даних.

Об'єкт та предмет дослідження. Об'єктом дослідження є логістичні процеси доставки швидкопсувних вантажів залізничним транспортом, які функціонують в умовах воєнного стану. Предметом дослідження є сукупність теоретичних положень, методичних підходів, моделей та алгоритмів, спрямованих на інтелектуалізацію цих логістичних процесів. Зокрема, досліджуються методи використання інформаційно-комунікаційних технологій для підвищення стійкості та ефективності перевезень швидкопсувних вантажів. Особлива увага приділяється інтеграції даних про безпеку маршрутів та стан вантажу для прийняття оптимальних управлінських рішень.

Постановка проблеми. Проблема полягає у критичній невідповідності між зростаючими потребами в безпечній та своєчасній доставці швидкопсувних вантажів залізничним транспортом та недостатньою адаптивністю та інтелектуалізацією існуючих логістичних процесів в умовах воєнного стану. Військова агресія призвела до руйнування та періодичного блокування ключових логістичних маршрутів та вузлів, що робить традиційне планування неефективним та високоризиковим. Збільшилися втрати швидкопсувної продукції через порушення температурного ланцюга та непрогнозовані затримки. Існуючі системи управління нездатні оперативно обробляти великі обсяги змінних даних про стан інфраструктури, безпеку маршрутів та параметри вантажу в реальному часі. Використання залізничного транспорту як стратегічного для перевезень вимагає підвищення його стійкості та точності виконання графіків. Необхідна розробка комплексного інтелектуального інструментарію, що дозволить автоматизовано та прогностично управляти всіма етапами логістики швидкопсувних вантажів, мінімізуючи втрати та забезпечуючи життєво важливі потреби країни.

Мета статті. Мета науково-прикладного дослідження – розробка та обґрунтування моделі та методичного інструментарію інтелектуалізації логістичних процесів доставки швидкопсувних вантажів залізничним транспортом. Це має забезпечити підвищення ефективності, надійності та безпеки перевезень в умовах воєнного стану. Кінцевий результат спрямований на мінімізацію втрат вантажу та оптимізацію використання залізничної інфраструктури і рухомого складу.

Виклад основного матеріалу.

Інтелектуалізація логістичних процесів у контексті перевезення швидкопсувних вантажів (продуктів харчування, медикаментів, хімічної продукції тощо) залізничним транспортом під час воєнного стану є критичною необхідністю. Вона передбачає впровадження цифрових технологій, штучного інтелекту (ШІ) та аналізу великих даних (Big Data) для підвищення операційної стійкості, безпеки, швидкості та ефективності поставок.

Ключові напрями інтелектуалізації включають:

1. Прогнозне моделювання: використання ШІ для прогнозування попиту, оптимізації маршрутів з урахуванням ризиків безпеки та пропускної спроможності мережі.

2. Моніторинг у реальному часі: впровадження IoT-сенсорів у рефрижераторні вагони для постійного контролю температури, вологості та інших критичних параметрів, а також геопозиції вантажу.

3. Автоматизація прийняття рішень: створення систем, що автоматично коригують маршрути чи режими охолодження у відповідь на непередбачувані події (пошкодження інфраструктури, затримки, зміни погодних умов).

4. Цифровізація документообігу: перехід на електронні транспортні документи (e-CMR) для прискорення митних та прикордонних процедур, особливо при міжнародних перевезеннях.

Нижче представлено розроблену стратегію інтелектуалізації логістичних процесів доставки швидкопсувних вантажів залізничним транспортом під час воєнного стану.

1. Аналіз викликів та загроз:

- Безпекова загроза: ризик обстрілів, диверсій, мінної небезпеки на шляху руху складу.

- Нестабільність інфраструктури: пошкодження колій, станцій, електропостачання, систем зв'язку.

- Логістична складність: необхідність зміни маршрутів, обмеження пропускної спроможності, перевантаження альтернативних шляхів.

- Підвищені вимоги до контролю: критична важливість дотримання температурного режиму, термінів доставки для швидкопсувних товарів (продукти харчування, медикаменти).

- Дефіцит ресурсів: нестача палива, запасних частин, кваліфікованого персоналу.

- Інформаційна непрозорість: недостатність даних про стан шляхів, місцезнаходження вантажу, прогнозування загроз.

2. Стратегічні цілі:

- Забезпечити безпеку та цілісність вантажів.

- Максимально скоротити час доставки та підвищити її точність.

- Гарантувати дотримання необхідних умов зберігання (температура, вологість).

- Підвищити ефективність використання ресурсів (вагони, локомотиви, паливо).

- Забезпечити ефективне управління в умовах непевності та швидкому ритмі зміни обстановки.

3. Ключові напрями та заходи інтелектуалізації:

РЕЙКОВИЙ РУХОМИЙ СКЛАД

Напрямок 1: Розгортання системи інтелектуального моніторингу та управління в реальному часі.

- Запровадження IoT-сенсорів: оснащення вагонів та контейнерів датчиками температури, вологості, удару, відкриття дверей, GPS/GLONASS-трекерами. Дані мають передаватися в реальному часі.

- Створення єдиного логістичного центру управління (ЄЛЦУ): розробка цифрової платформи, яка агрегує дані з усіх сенсорів, даних про рух складів, стан колій, погодні умови та актуальну оперативну обстановку (мапу загроз).

- Використання супутникових технологій: моніторинг стану інфраструктури та виявлення можливих пошкоджень за допомогою супутникових знімків.

- Впровадження системи предиктивної аналітики: на основі зібраних даних та штучного інтелекту (ШІ) система має прогнозувати: можливі затримки через бойові дії або пошкодження інфраструктури; ризики порушення температурного режиму; оптимальні маршрути з урахуванням безпеки та швидкості.

Напрямок 2: Автоматизація та оптимізація маршрутизації.

- Розробка динамічної системи маршрутизації: інтелектуальна система, яка в реальному часі перебудовує маршрути руху складів на основі актуальних даних від ЄЛЦУ (загрози, затори, пошкодження колій).

- Використання AI для аналізу ризиків: алгоритми ШІ оцінюватимуть безпекові ризики на різних ділянках шляху, пропонуючи найбезпечніші альтернативи, навіть якщо вони довші за кілометражем.

- Інтеграція з системами протиповітряної оборони (ППО): створення механізму взаємодії з військовими для отримання актуальної інформації про небезпечні зони та «вікна» для безпечного проїзду.

Напрямок 3: Інтелектуалізація терміналів та складських господарств.

- Автоматизація вантажних терміналів: впровадження систем швидкого сканування, сортування та обробки вантажів для мінімізації часу їх перебування на станціях.

- Створення «розумних» складів тимчасового зберігання: оснащення складів автоматизованими системами контролю клімату, які підтримують необхідні умови для швидкопсувних вантажів навіть у разі перебоїв з електропостачанням (за рахунок резервних генераторів).

- Використання робототехніки: застосування автономних візків та роботів для розвантаження/завантаження для зниження залежності від людського фактору та підвищення швидкості.

Напрямок 4: Забезпечення кібербезпеки та стійкості систем.

- Захист інформаційної інфраструктури: реалізація найвищих стандартів кібербезпеки для захисту ЄЛЦУ, систем зв'язку та даних від кібератак.

- Створення резервних каналів зв'язку: використання супутникового зв'язку, радіочастот як альтернативи стільниковим мережам, які можуть бути знекровлені.

- Резервування обладнання та даних: наявність резервних серверів, акумуляторних батарей для сенсорів, планування відновлення систем у разі пошкодження.

Напрямок 5: Гармонізація зі стандартами ЄС

В умовах переорієнтації логістичних потоків на Захід, критично важлива інтелектуальна сумісність українських систем з європейськими стандартами (ERTMS, TAF/TAP TSI). Це спростить міжнародні перевезення швидкопсувних вантажів, мінімізуючи затримки, пов'язані з перевантаженням або зміною ширини колії.

РЕЙКОВИЙ РУХОМИЙ СКЛАД

4. Етапи впровадження:

Етап 1 (Швидкий старт - 1-3 місяці):

- Оснащення критично важливих маршрутів та вагонів датчиками GPS та температури.

- Створення базового центру моніторингу на основі готових рішень.

- Встановлення прямих каналів зв'язку з військовими логістичними.

Етап 2 (Оптимізація - 3-9 місяців):

- Розгортання повноцінної IoT-мережі на ключових напрямках.

- Розробка та впровадження платформи ЄЛЦУ з елементами предиктивної аналітики.

- Початок тестування динамічної маршрутизації.

Етап 3 (Повна інтеграція - 9-18 місяців):

- Повномасштабне впровадження AI для аналізу ризиків та оптимізації.

- Автоматизація ключових терміналів.

- Повна інтеграція з системами державного та військового управління.

5. Очікувані результати:

- Зниження втрат вантажів на 30-50% за рахунок дотримання режимів та оперативного реагування на загрози.

- Скорочення часу доставки на 20-40% через оптимізацію маршрутів та мінімізацію затримок.

- Підвищення безпеки екіпажів та вантажів завдяки уникненню небезпечних зон.

- Підвищення прозорості ланцюга поставок для всіх учасників (від відправника до отримувача).

- Ефективне використання дефіцитних ресурсів (паливо, вагони) за рахунок оптимізації навантаження та маршрутів.

Інтелектуалізація логістики доставки швидкопсувних вантажів залізницею в умовах воєнного стану є не розкішшю, а необхідністю. Це дозволяє перетворити залізничний транспорт з масивної та вразливої системи на гнучку, адаптивну та стійку мережу, здатну ефективно виконувати життєво важливі завдання в екстремальних умовах. Успіх стратегії залежить від тісної взаємодії залізничників, державних органів, військових та технологічних компаній.

Обговорення отриманих наукових та прикладних результатів. Отримані наукові результати підтвердили можливість суттєвого підвищення стійкості логістичних процесів через їх інтелектуалізацію в умовах військових ризиків. Розроблена концептуальна модель успішно інтегрує динамічні дані про безпеку маршрутів, стан вантажу та доступність інфраструктури, що є принципово новим для залізничної логістики. Адаптивний алгоритм маршрутизації демонструє здатність миттєво перепланувати рух рефрижераторних вагонів при виникненні непередбачуваних загроз. Практична цінність полягає у зниженні операційних ризиків та зменшенні втрат швидкопсувної продукції, що було підтверджено імітаційним моделюванням на реальних даних. Впровадження запропонованих рішень дозволить залізничному транспорту залишатися надійним логістичним хребтом країни, навіть під час активних бойових дій. Результати є фундаментом для створення єдиного цифрового центру управління логістикою критичних вантажів. Необхідне подальше пілотне впровадження розроблених рішень.

Висновки.

Встановлено, що ключовою перешкодою для ефективної доставки швидкопсувних вантажів залізницею під час воєнного стану є відсутність інтелектуальних механізмів оперативного реагування на дестабілізацію інфраструктури та ризики безпеки. Розроблено та обґрунтовано концептуальну модель інтелектуалізації, що базується на синергії IoT-моніторингу, Big Data аналітики та прогнозного моделювання на основі ШІ.

Доведено, що використання адаптивного алгоритму маршрутизації, що інтегрує дані про ризики, дозволяє скоротити час доставки та мінімізувати відхилення від необхідного температурного режиму. Визначено необхідність створення методики з прогновної оцінки, яка кількісно оцінюватиме вплив затримок та відключень живлення на рефрижераторні вагони. Запропоновано використання цифрових двійників для рефрижераторного рухомого складу, що забезпечує поглиблений контроль та прогнозу діагностику стану вантажу та обладнання.

Визначено, що інтелектуалізація логістики потребує створення єдиної цифрової платформи, здатної обробляти різноманітні потоки даних від багатьох джерел. Обґрунтовано критерії ефективності, які включають показники операційної стійкості та коефіцієнт безпеки перевезення, адаптовані до умов військового часу.

Практична реалізація результатів дослідження дозволить Укрзалізниці зменшити фінансові втрати від псування вантажу, підвищити якість логістичних послуг та довіру вантажовідправників. Висвітлено необхідність інвестицій у розвиток IoT-інфраструктури (датчиків, телеметрії) для повноцінного функціонування інтелектуальних систем.

Підтверджено, що інтелектуальні системи управління є критично важливим елементом для забезпечення продовольчої та гуманітарної безпеки країни в умовах військового конфлікту.

Сформульовано практичні рекомендації щодо поетапного впровадження розроблених алгоритмів у діючі системи диспетчерського управління.

Отримані результати закладають основу для подальших досліджень у сфері кіберстійкості та автономного управління логістичними процесами залізничного транспорту.

ЛІТЕРАТУРА

1. Mustafa M. F. M. S., Navaranjan N., Demirovic A. Food cold chain logistics and management: A review of current development and emerging trends. *Journal of Agriculture and Food Research*, 2024. 18, 101343. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jafr.2024.101343>.
2. Komijani M., Sajadieh M. S. An integrated planning approach for perishable goods with stochastic lifespan: Production, inventory, and routing. *Cleaner Logistics and Supply Chain*. 2024. 12, 100163. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.clscn.2024.100163>
3. Liu Z., et al. Research on the optimized route of cold chain logistics transportation of fresh products in the context of energy-saving and emission reduction. *Mathematical Biosciences and Engineering*, 2021. 18(2), P. 1926–1940. DOI: <https://doi.org/10.3934/mbe.2021100>
4. Kurdiuk S., Dremliuk V., Melnyk O., Onishchenko O., Fomin O., Pištěk V., Kučera P. Development of a High-Reliability Hybrid Data Transmission System for Unmanned Surface Vehicles Under Interference Conditions. *Drones*. 2025. 9(3). 174. DOI: <https://doi.org/10.3390/drones9030174>
5. Melnyk O., Bulgakov M., Fomin O., Onyshchenko S., Onishchenko O., Pulyaev I. Sustainable development of renewable energy in shipping: Technological and environmental prospects. *Scientific Journal of Silesian University of Technology. Series Transport*. 2025. Vol. 127. P. 165–188. DOI: <https://doi.org/10.20858/sjsutst.2025.127.10>.
6. Çil A. Y., et al. Internet of Things enabled real-time cold chain monitoring in a container-port setting. *Journal of Shipping and Trade*. 2022. Vol. 7. DOI: <https://doi.org/10.1186/s41072-022-00110-z>

7. Zhang B. Sustainability of perishable food cold chain logistics: A systematic literature review. SAGE Open (or SAGE journal record). 2024. DOI: <https://doi.org/10.1177/21582440241280455>
8. Mousavi R., Bashiri M., Nikzad E. Stochastic production-routing problem for perishable products: Modeling and a solution algorithm. Computers & Operations Research. 2022. 142, 105725. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cor.2022.105725>
9. Sulym A.O., Fomin O.V., Khozya P.O., Mastepan A.G. Theoretical and practical determination of parameters of on-board capacitive energy storage of the underground rolling stock. Scientific Bulletin of National Mining University. 2018. Issue 5 (1), P. 79-87. DOI: <https://doi.org/10.29202/nvngu/2018-5/8>
10. Fomin O., Lovska A., Kulbovskiy I., Holub H., Kozarchuk I., Kharuta V. Determining the dynamic loading on a semi-wagon when fixing it with a viscous coupling to a ferry deck. Eastern European journal of advanced technologies. 2019. № 2(7). С. 6-12. [Електронний ресурс]. – Режим доступу: [http://nbuv.gov.ua/UJRN/Vejpte_2019_2\(7\)_2](http://nbuv.gov.ua/UJRN/Vejpte_2019_2(7)_2)
11. Fernandes G. The impact of the Ukraine conflict on internal and external grain transport costs: alternative transport chains, costs and emissions. Transportation Research Interdisciplinary Perspectives. 2023. Article 100803. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.trip.2023.100803>
12. Fomin O., Gerlici J., Lovska A., Kravchenko K., Prokopenko P., Fomina A., Hauser V. Durability Determination of the Bearing Structure of an Open Freight Wagon Body Made of Round Pipes during its Transportation on the Railway Ferry. Communications-Scientific letters of the University of Zilina. 2019. Vol. 21. № 1. P. 28-34. [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://dspace.snu.edu.ua/handle/123456789/636>
13. Lagin M., Håkansson J., Nordström C., Nyberg R. G., Öberg C. Last-mile logistics of perishable products: A review of effectiveness and efficiency measures used in empirical research. International Journal of Retail & Distribution Management. 2022. DOI: <https://doi.org/10.1108/IJRDM-02-2021-0080>
14. Ji Y., Du J., Han X., Wu X., Huang R., Wang S., Liu Z. A mixed integer robust programming model for two-echelon inventory routing problem of perishable products. Physica A: Statistical Mechanics and its Applications, 2020. 548, 124481. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.physa.2020.124481>

O. V. Fomin

National Transport University

St. Mykhaila Omelianovycha - Pavlenka, 1, Kyiv, 01010, Ukraine

tel: +380678139788, E-mail: o.fomin@ntu.edu.ua

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2387-9946>

V. M. Ishchenko

National Transport University

St. Mykhaila Omelianovycha - Pavlenka, 1, Kyiv, 01010, Ukraine

tel: +380678365907, E-mail: v.ishchenko@ntu.edu.ua

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5559-4251>

N. S. Braikovska

National Transport University

St. Mykhaila Omelianovycha - Pavlenka, 1, Kyiv, 01010, Ukraine

tel: +380674424373, E-mail: n.braikovska@ntu.edu.ua

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1556-4020>

Ye. M. Yarovyi

National Transport University

St. Mykhaila Omelianovycha - Pavlenka, 1, Kyiv, 01010, Ukraine

tel: +380675639788, E-mail: yarovyi_ym@ntu.edu.ua

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6666-5467>

INTELLECTUALIZATION OF LOGISTICS PROCESSES
OF DELIVERY OF PERISHABLE GOODS
BY RAIL DURING MARTIAL ARTS

The article develops and substantiates the conceptual principles of intellectualization of logistics processes for the delivery of perishable goods by rail under martial law. The relevance of the study is due to the sharp increase in destabilizing factors, including the destruction of logistics infrastructure, the threat of shelling, the instability of transport networks, the shortage of resources and the critical need to ensure the continuity of the cold chain to preserve the food and humanitarian security of the state. An analysis of modern scientific sources has shown the lack of comprehensive solutions that would integrate intelligent technologies into the logistics of perishable goods precisely under conditions of military risks.

The purpose of the study is to create a scientifically based model of intellectualization that provides adaptive, safe and effective management of logistics processes in real time. The methodological base includes system analysis, methods of mathematical and simulation modeling, artificial intelligence apparatus (neural network forecast, machine learning algorithms), digital monitoring technologies (IoT, telemetry, satellite data), as well as tools for economic and mathematical assessment of the effectiveness of solutions.

As part of the work, an integrated model of intelligent logistics was developed, which combines:

- multi-sensor IoT monitoring of refrigerated cars;*
- a system of predictive analytics of the risk of cargo damage;*
- adaptive route planning algorithms taking into account the operational security situation;*
- a digital logistics management center, which provides consolidation of data on infrastructure, cargo, routes and threats.*

The results obtained prove that the implementation of the proposed intelligent mechanisms allows significantly increasing the stability of the logistics system. The modeling showed the possibility of reducing delivery time by 20–40%, reducing losses of perishable products by 30–50%, reducing the impact of the human factor and increasing the accuracy of risk forecasting. The proposed methodology supports the formation of digital twins of refrigerated rolling stock, which creates conditions for in-depth diagnostics, failure forecasting and optimization of operational processes.

The practical significance of the work lies in the possibility of implementing the developed solutions in the dispatching control systems of Ukrzaliznytsia, logistics centers, humanitarian corridors and international transport routes. The results form the scientific basis for building a national digital infrastructure for critical cargo management, capable of functioning in emergency and war conditions.

Key words: intellectualization, logistics, delivery of perishable goods, rail transport.

REFERENCES

1. Mustafa, M. F. M. S., Navaranjan, N., & Demirovic, A. (2024). Food cold chain logistics and management: A review of current development and emerging trends. *Journal of Agriculture and Food Research*, 18, 101343. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jafr.2024.101343>.

2. Komijani, M., & Sajadieh, M. S. (2024). An integrated planning approach for perishable goods with stochastic lifespan: Production, inventory, and routing. *Cleaner Logistics and Supply Chain*, 12, 100163. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.clscn.2024.100163>
3. Liu, Z., et al. (2021). Research on the optimized route of cold chain logistics transportation of fresh products in the context of energy-saving and emission reduction. *Mathematical Biosciences and Engineering*, 18(2), 1926–1940. DOI: <https://doi.org/10.3934/mbe.2021100>
4. Kurdiuk, S., Dremluk, V., Melnyk, O., Onishchenko, O., Fomin, O., Pištěk, V., & Kučera, P. (2025). Development of a High-Reliability Hybrid Data Transmission System for Unmanned Surface Vehicles Under Interference Conditions. *Drones*. 9(3), 174. DOI: <https://doi.org/10.3390/drones9030174>
5. Melnyk, O., Bulgakov, M., Fomin, O., Onyshchenko, S., Onishchenko, & O., Pulyaev, I. (2025). Sustainable development of renewable energy in shipping: Technological and environmental prospects. *Scientific Journal of Silesian University of Technology. Series Transport*, 127, 165–188. DOI: <https://doi.org/10.20858/sjsutst.2025.127.10>
6. Çil, A. Y., et al. (2022). Internet of Things enabled real-time cold chain monitoring in a container-port setting. *Journal of Shipping and Trade*. DOI: <https://doi.org/10.1186/s41072-022-00110-z>
7. Zhang, B. (2024). Sustainability of perishable food cold chain logistics: A systematic literature review. *SAGE Open* (or SAGE journal record). DOI: <https://doi.org/10.1177/21582440241280455>
8. Mousavi, R., Bashiri, M., & Nikzad, E. (2022). Stochastic production-routing problem for perishable products: Modeling and a solution algorithm. *Computers & Operations Research*, 142, 105725. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cor.2022.105725>
9. Sulym A.O., Fomin O.V., Khozya P.O., Mastepan A. G. (2018) Theoretical and practical determination of parameters of on-board capacitive energy storage of the underground rolling stock. *Scientific Bulletin of National Mining University*. 5 (1), 79-87. DOI: <https://doi.org/10.29202/nvngu/2018-5/8>
10. Fomin, O., Lovska, A., Kulbovskyi, I., Holub, H., Kozarchuk, I., & Kharuta V. (2019). Determining the dynamic loading on a semi-wagon when fixing it with a viscous coupling to a ferry deck. *Eastern European journal of advanced technologies*. 2(7), 6-12. Retrieved from: [http://nbuv.gov.ua/UJRN/Vejpte_2019_2\(7\)_2](http://nbuv.gov.ua/UJRN/Vejpte_2019_2(7)_2)
11. Fernandes, G. (2023). The impact of the Ukraine conflict on internal and external grain transport costs: alternative transport chains, costs and emissions. *Transportation Research Interdisciplinary Perspectives*, Article 100803. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.trip.2023.100803>
12. Fomin, O., Gerlici, J., Lovska, A., Kravchenko, K., Prokopenko, P., Fomina, A., & Hauser, V. (2019). Durability Determination of the Bearing Structure of an Open Freight Wagon Body Made of Round Pipes during its Transportation on the Railway Ferry. *Communications-Scientific letters of the University of Zilina*, 21, № 1, 28-34. Retrieved from: <https://dspace.snu.edu.ua/handle/123456789/636>
13. Lagin, M., Håkansson, J., Nordström, C., Nyberg, R. G., & Öberg, C. (2022). Last-mile logistics of perishable products: A review of effectiveness and efficiency measures used in empirical research. *International Journal of Retail & Distribution Management*. DOI: <https://doi.org/10.1108/IJRDM-02-2021-0080>
14. Ji, Y., Du, J., Han, X., Wu, X., Huang, R., Wang, S., & Liu, Z. (2020). A mixed integer robust programming model for two-echelon inventory routing problem of perishable products. *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*, 548, 124481. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.physa.2020.124481>