

<https://doi.org/10.31891/2219-9365-2025-83-18>

УДК 656.073.4:004.8:629.735.7

ЛЕЩЕНКО Юлія

Вінницький національний технічний університет

<https://orcid.org/0009-0003-1563-5949>

e-mail: leshchenko@vntu.edu.ua

МОРОЗ Ігор

Вінницький національний технічний університет

<https://orcid.org/0009-0004-9241-5859>

e-mail: igor3003moroz@gmail.com

ЮХИМЧУК Марія

Вінницький національний технічний університет

<https://orcid.org/0000-0002-8131-9739>

e-mail: umc1987@vntu.edu.ua

ДЕЦЕНТРАЛІЗОВАНА ДОСТАВКА "ОСТАННЬОЇ МИЛІ" З ВИКОРИСТАННЯМ ШІ ТА 5G: ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ТА ШВИДКОСТІ В МЕРЕЖАХ НОВОГО ПОКОЛІННЯ

Ця стаття є логічним продовженням дослідження децентралізованої доставки "останньої милі" з використанням штучного інтелекту (ШІ), представленого в попередній роботі "Оптимізація децентралізованої доставки останньої милі за допомогою штучного інтелекту / Ю. Лещенко та ін. XVII Міжнародна конференція Контроль і управління в складних системах (КУСС-2024). Вінниця, 2024" [1]. Розглядається інтеграція технології 5G для подальшого підвищення ефективності, швидкості та масштабованості децентралізованих мереж доставки. Досліджено вплив надшвидкісних та наднизьких затримок 5G на оптимізацію маршрутів, управління автопарком і загальну координацію логістики "останньої милі". Обговорюються потенційні виклики та можливості, пов'язані з цим поєднанням, а також перспективи майбутніх розробок, включаючи інтеграцію автономних транспортних засобів, керованих ШІ, у середовищах 5G.

Ключові слова: штучний інтелект, децентралізована доставка, оптимізація маршрутів, 5G, мережі нового покоління, автономні транспортні засоби, остання миля.

LESHCHENKO Yuliia, MOROZ Ihor, YUKHYMCHUK Mariia

Vinnitsia National Technical University

DECENTRALIZED LAST-MILE DELIVERY USING AI AND 5G: IMPROVING EFFICIENCY AND SPEED IN NEXT-GENERATION NETWORKS

This paper explores the integration of artificial intelligence (AI) and fifth-generation mobile networks (5G) into decentralized last-mile delivery systems, aiming to improve efficiency, scalability, and customer satisfaction. Building on previous research, which employed AI-driven optimization techniques such as genetic algorithms and real-time weather data integration, the study highlights how 5G technology can overcome existing challenges related to network latency, data transmission speed, and coordination within decentralized logistics networks. The ultra-fast data transfer rates and ultra-low latency of 5G enable real-time route optimization, dynamic fleet management, and seamless coordination between multiple delivery nodes, significantly reducing delivery times and operational costs. The paper also examines the role of AI-powered autonomous vehicles supported by 5G, which can address the shortage of couriers and enhance delivery safety and efficiency in densely populated areas. Furthermore, the research analyzes potential applications of blockchain technology in last-mile logistics, particularly in enhancing transparency, authenticity verification, and automation through smart contracts. Key technical challenges such as infrastructure costs, limited network coverage, interoperability, cybersecurity, interference, and energy consumption are also discussed, along with potential solutions including network slicing, adaptive interference management, and blockchain-based security models. The study emphasizes the future potential of combining 5G, AI, and blockchain in creating sustainable, adaptive, and customer-oriented logistics ecosystems. Promising directions include machine learning for demand prediction, on-demand and drone-based deliveries, energy optimization, and advanced indoor navigation supported by 5G. Overall, the paper argues that integrating 5G into decentralized last-mile delivery not only addresses existing limitations but also opens avenues for innovation in logistics, contributing to economic growth, environmental sustainability, and improved quality of urban life.

Keywords: artificial intelligence, decentralized delivery, route optimization, 5G, next-generation networks, autonomous vehicles, last mile.

Стаття надійшла до редакції / Received 14.07.2025

Прийнята до друку / Accepted 14.08.2025

ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМИ У ЗАГАЛЬНОМУ ВИГЛЯДІ ТА ЇЇ ЗВ'ЯЗОК ІЗ ВАЖЛИВИМИ НАУКОВИМИ ТА ПРАКТИЧНИМИ ЗАВДАННЯМИ

У попередній статті "Оптимізація децентралізованої доставки останньої милі за допомогою штучного інтелекту / Ю. Лещенко та ін. XVII Міжнародна конференція Контроль і управління в складних системах (КУСС-2024). Вінниця, 2024" [1], присвяченій децентралізованій доставці "останньої милі" та її оптимізації

за допомогою штучного інтелекту (ШІ), було розглянуто використання генетичних алгоритмів та інтеграцію даних про погоду в реальному часі для покращення маршрутизації та ефективності доставки. Акцент робився на здатності ШІ аналізувати великі обсяги даних, робити прогнози та автоматизувати процеси прийняття рішень, щоб вирішити складнощі, пов'язані з традиційною централізованою доставкою. Проте, навіть з передовими алгоритмами ШІ, існують обмеження, пов'язані зі швидкістю передачі даних, затримками в мережі та загальною координацією в децентралізованій системі.

Сьогодні, з розгортанням мереж 5G, відкриваються нові можливості для оптимізації логістики "останньої милі". Надвисока швидкість передачі даних, наднизькі затримки та підвищена надійність 5G обіцяють революцію в багатьох галузях, зокрема в логістиці та ланцюгах поставок [2]. Це дає можливість для більш ефективних, гнучких та адаптивних рішень, які можуть задовольнити потреби споживачів, що швидко змінюються.

Ця стаття має на меті розширити попереднє дослідження, зосереджуючись на впливі 5G на децентралізовану доставку "останньої милі" з використанням ШІ. Метою є визначення того, як 5G може не тільки вирішити існуючі обмеження, але й відкрити нові можливості для інновацій та підвищення ефективності. Розглянуті будуть наступні аспекти:

1. Переваги інтеграції 5G у децентралізовані мережі доставки "останньої милі".
2. Як 5G впливає на оптимізацію маршрутів, управління автопарком та координацію логістики в режимі реального часу.
3. Виклики та обмеження, пов'язані з використанням 5G в логістиці "останньої милі".
4. Майбутні напрямки досліджень та розробок, включаючи інтеграцію автономних транспортних засобів та ШІ в середовищах 5G.

Децентралізована доставка "останньої милі" передбачає використання розподіленої мережі локальних пунктів доставки, що дозволяє скоротити час доставки, підвищити задоволеність клієнтів та збільшити масштабованість операцій. У попередній роботі було продемонстровано, що ШІ може ефективно керувати та оптимізувати цю децентралізовану мережу, враховуючи фактори, такі як затори на дорогах, погодні умови та пріоритети доставки. Використання генетичних алгоритмів дозволило значно поліпшити маршрутизацію та ефективність використання ресурсів. З метою оптимізації маршрутів доставки використовується функція мінімізації середнього часу прибуття [3]:

$$\min \left(\sum_{i=1}^n \frac{d_i}{v_i} \right) \quad (1)$$

де d_i – довжина маршруту i , v_i – середня швидкість транспортного засобу i . Такий підхід дозволяє ефективно розподіляти маршрути в умовах змінного трафіку.

Однак, інтеграція та координація між різними пунктами доставки та транспортними засобами залишались обмеженими можливостями існуючої інфраструктури зв'язку.

ВИКЛАД ОСНОВНОГО МАТЕРІАЛУ

Інтеграція 5G пропонує рішення для багатьох обмежень, з якими стикається децентралізована доставка "останньої милі".

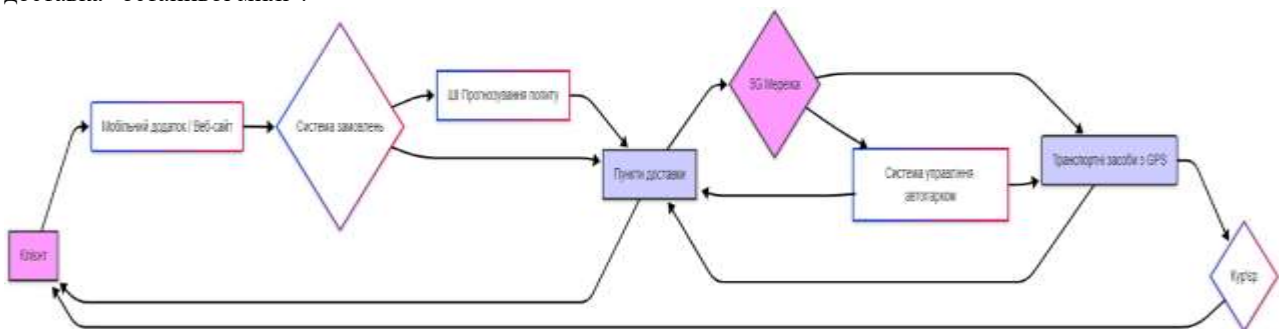


Рис. 1. Потік даних у децентралізованій системі доставки "останньої милі" з 5G та ШІ

Ключові переваги:

- **Оптимізація маршрутів в режимі реального часу:** 5G забезпечує надшвидкісний та надійний зв'язок, що дозволяє отримувати дані про трафік, погодні умови та інші фактори в режимі реального часу. Це

дозволяє ШІ динамічно змінювати маршрути доставки, уникаючи заторів та оптимізуючи час та витрати. В попередній роботі, згадані погодні дані та трафік, але 5G підвищує швидкість та точність отримання цієї інформації, дозволяючи більш гнучке реагування [4], [7].

• **Управління автопарком:** Зв'язок 5G дозволяє в режимі реального часу відстежувати розташування та стан кожного транспортного засобу в автопарку. Це дозволяє операторам оптимізувати розподіл завдань, враховуючи доступність транспортних засобів, їх вантажопідйомність та відстань до пунктів доставки. Крім того, можливо діагностування технічного стану автомобілів дистанційно, що дозволить уникнути простоїв.

• **Координація між пунктами доставки:** 5G забезпечує безперебійний зв'язок між різними пунктами доставки, що дозволяє ефективно координувати передачу посилок та оптимізувати використання ресурсів. Це особливо важливо для децентралізованих мереж, де пункти доставки можуть бути розташовані в різних районах міста.

• **Підтримка автономних транспортних засобів:** З низькою затримкою та високою надійністю, 5G є критично важливим для підтримки безпечної та ефективної роботи автономних транспортних засобів. Одним з ключових технічних факторів при роботі автономних ТЗ є загальна затримка сигналу (end to end latency) [8]:

$$Te2e = T_{tx} + T_{propagation} + T_{processing} + T_{queue} \quad (2)$$

де:

- T_{tx} – час передачі,
- $T_{propagation}$ – час розповсюдження сигналу,
- $T_{processing}$ – час обробки даних,
- T_{queue} – затримка в черзі на маршрутизаторі.

Автономні транспортні засоби, керовані ШІ, можуть значно зменшити витрати на доставку та підвищити її швидкість, особливо в густонаселених районах. Це дозволяє вирішити проблему нестачі кур'єрів, особливо в періоди пікового попиту.

• **Покращений досвід клієнтів:** 5G дозволяє надавати клієнтам більш точну та актуальну інформацію про статус їх замовлень. Це включає в себе відстеження посилки в реальному часі, отримання повідомлень про зміни в графіку доставки та можливість зв'язку з кур'єром.



Рис. 2. Переваги 5G, релевантні до децентралізованої доставки "останньої милі" з використанням ШІ

Технічні виклики та обмеження

Інтеграція 5G в децентралізовану доставку "останньої милі", хоч і обіцяє багато переваг, має певні технічні виклики та обмеження, які необхідно враховувати:

• **Вартість інфраструктури:** Розгортання мереж 5G вимагає значних інвестицій у інфраструктуру, включаючи встановлення нових базових станцій та оновлення існуючого обладнання. Це може стати перешкодою для малих та середніх підприємств, які займаються доставкою.

• **Покриття мережі:** Покриття 5G ще не є повним, особливо в сільській місцевості та віддалених районах. Це може обмежити використання 5G в децентралізованих мережах доставки, які охоплюють широкі географічні зони. Необхідне забезпечення стабільного та широкого покриття для повноцінної реалізації переваг 5G [7].

• **Інтероперабельність:** Важливо забезпечити інтероперабельність (здатність різних систем, пристроїв, мереж або програмного забезпечення обмінюватися даними та взаємодіяти ефективно без необхідності адаптації або ручного втручання) між різними пристроями та системами, які використовуються в децентралізованій мережі доставки. Це включає в себе транспортні засоби, пункти доставки, системи управління автопарком та мобільні пристрої кур'єрів. Стандартизація протоколів зв'язку та обміну даними є критично важливою для забезпечення безперебійної роботи всієї системи.

• **Кібербезпека:** Збільшення обсягу даних, що передаються через мережу 5G, підвищує ризик кіберзлочинів. Необхідно вжити заходів для захисту даних про клієнтів, маршрути доставки та фінансову інформацію. Це включає в себе використання сучасних методів шифрування, автентифікації та захисту від вторгнень.

• **Інтерференція сигналів:** Інтерференція (небажане перекриття радіосигналів, яке знижує якість або цілісність передачі даних) у 5G мережах є ще однією з критичних проблем. Зі збільшенням кількості пристроїв, що працюють у межах однієї мережі, виникає необхідність розробки методів управління інтерференцією, що забезпечують стабільний зв'язок з високою пропускну здатністю.

Затримки в мережі, які можуть негативно впливати на реальний час передачі даних, особливо важливі в застосуваннях, що вимагають наднизької латентності, як-от системи охорони здоров'я або автономне водіння. Технологія Ultra-Reliable Low-Latency Communication (URLLC) впроваджується в 5G для забезпечення потрібного рівня надійності та швидкодії, проте вона вимагає суттєвих модифікацій існуючої інфраструктури [5].

• **Енергоспоживання:** Оптимізація енергоспоживання є ще одним викликом, оскільки численні пристрої мають обмежені джерела живлення. Забезпечення високої енергоефективності шляхом динамічного управління енергоспоживанням, використання алгоритмів прогнозування споживання та оптимізованих протоколів зв'язку стає пріоритетом для впровадження технологій 5G17. Таблиця нижче дає уявлення про основні технічні виклики інтеграції 5G.

Таблиця 1

Основні технічні виклики та технологічні рішення для інтеграції 5G

Категорія викликів	Основні проблеми	Технологічні рішення
Безпека та конфіденційність	Несанкціонований доступ, витік даних	Блокчейн, автентифікація, постійний моніторинг
Розподіл ресурсів	Масштабованість, динамічний розподіл ресурсів	Мережевий слайсінг, алгоритми глибокого підкріплення
Інтерференція та затримки	Перешкоди сигналу, висока латентність	URLLC, адаптивні алгоритми управління інтерференцією
Енергоспоживання	Обмежене джерело живлення IoT-пристроїв	Оптимізація енергоспоживання, алгоритми прогнозування

Дослідження використання блокчейну в логістиці “останньої милі”

Приклади використання:

• **Підвищення прозорості та відстежуваності:** Блокчейн забезпечує незмінний та децентралізований реєстр, що дозволяє всім учасникам мережі бачити інформацію про походження товару, його місцезнаходження та умови зберігання. Це особливо корисно для відстеження чутливих до температури продуктів або товарів з високою вартістю.

• **Захист від підробок:** Блокчейн може використовуватися для перевірки автентичності товарів, запобігаючи потраплянню підробок у ланцюг поставок.

• **Автоматизація контрактів та платежів:** Смарт-контракти на базі блокчейну можуть автоматично виконувати умови угоди між сторонами, наприклад, автоматично здійснювати оплату після підтвердження доставки.

• **Оптимізація маршрутів:** Хоча це і не основна функція блокчейну, інтеграція з іншими технологіями, такими як AI, може допомогти в оптимізації маршрутів доставки, використовуючи дані, що зберігаються в блокчейні.

• **Управління запасами:** Блокчейн може допомогти в ефективному управлінні запасами, забезпечуючи точну інформацію про наявні товари в режимі реального часу [6].

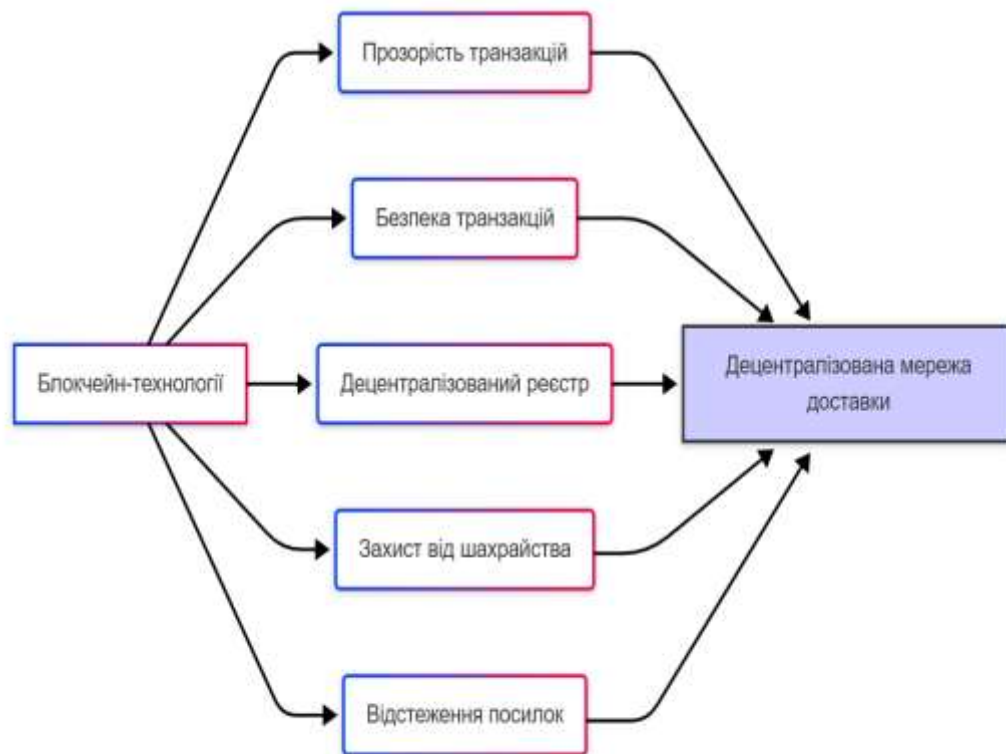


Рис. 3. Використання блокчейну

Типи блокчейн-платформ, які найкраще підходять для децентралізованої доставки:

Вибір блокчейн-платформи залежить від конкретних потреб мережі доставки. Важливими факторами є:

- **Масштабованість:** Платформа повинна бути здатною обробляти велику кількість транзакцій, особливо якщо мережа доставки охоплює велику територію.
- **Вартість транзакцій:** Вартість транзакцій на блокчейні повинна бути прийнятною, щоб не збільшувати витрати на доставку.
- **Безпека:** Платформа повинна забезпечувати високий рівень безпеки для захисту даних від несанкціонованого доступу.
- **Приватність:** Залежно від вимог, платформа може забезпечувати різні рівні приватності даних.
- **Підтримка смарт-контрактів:** Смарт-контракти дозволяють автоматизувати багато процесів в логістиці.

Деякі з найпопулярніших блокчейн-платформ, які можуть бути використані для децентралізованої доставки:

- **Ethereum:** Одна з найпопулярніших блокчейн-платформ з розвинутою екосистемою та підтримкою смарт-контрактів 1. Ethereum є децентралізованою платформою, що робить її привабливою для децентралізованих рішень 235.
- **Hyperledger Fabric:** Платформа з відкритим кодом, розроблена Linux Foundation, яка підходить для створення приватних та дозволених блокчейн-мереж. Hyperledger Fabric забезпечує високу продуктивність та гнучкість.
- **Corda:** Блокчейн-платформа, розроблена спеціально для бізнес-додатків, з акцентом на конфіденційність та безпеку.
- **Binance Smart Chain (BSC):** Блокчейн, сумісний з Ethereum, який пропонує нижчі комісії за транзакції та швидший час обробки.

ВИСНОВКИ З ДАНОГО ДОСЛІДЖЕННЯ

І ПЕРСПЕКТИВИ ПОДАЛЬШИХ РОЗВІДОК У ДАНОМУ НАПРЯМІ

Інтеграція 5G в децентралізовану доставку "останньої милі" є перспективним напрямком, який потребує подальших досліджень та розробок. Ось деякі з можливих напрямків майбутніх досліджень:

• **Використання машинного навчання для прогнозування попиту:** Машинне навчання може бути використано для прогнозування попиту на доставку в різних районах міста. Це дозволить операторам оптимізувати розподіл ресурсів та зменшити час доставки. Алгоритми машинного навчання можуть аналізувати історичні дані про замовлення, погодні умови, події та інші фактори, щоб точно прогнозувати попит на доставку.

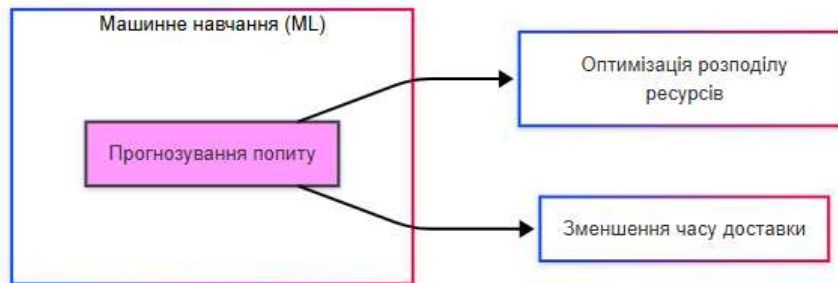


Рис. 4. Використання машинного навчання для прогнозування попиту

• **Розробка нових бізнес-моделей:** Інтеграція 5G відкриває можливості для розробки нових бізнес-моделей в сфері доставки "останньої милі". Це може включати в себе доставку дронами, доставку за запитом (on-demand delivery) та спільну доставку (crowdsourced delivery).



Рис. 5. Розробка нових бізнес-моделей

• **Оптимізація енергоефективності:** Подальші дослідження в області енергоефективності технологій 5G та розробка нових рішень для живлення транспортних засобів та пунктів доставки можуть допомогти зменшити екологічний вплив децентралізованої доставки "останньої милі". Використання відновлюваних джерел енергії та розробка більш ефективних акумуляторів є важливими кроками в цьому напрямку.

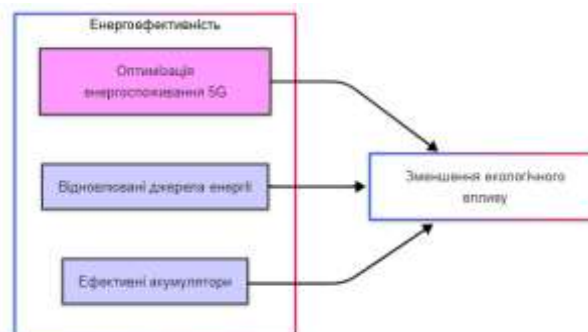


Рис. 6. Оптимізація енергоефективності

• **Використання 5G для покращення навігації в закритих приміщеннях (indoor navigation):** 5G може забезпечити точну навігацію в закритих приміщеннях, таких як торгові центри та великі офісні будівлі. Це дозволить кур'єрам швидше та ефективніше знаходити потрібні адреси доставки.

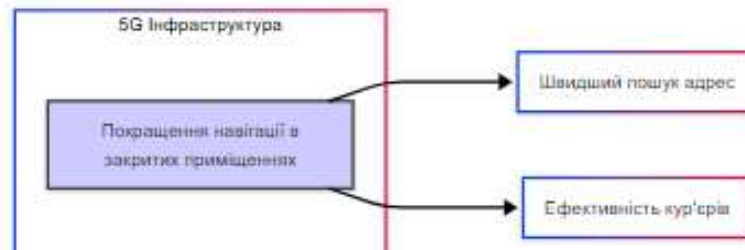


Рис. 7. Indoor navigation

Інтеграція 5G в децентралізовану доставку "останньої милі" з використанням штучного інтелекту відкриває значні можливості для підвищення ефективності, швидкості та масштабованості логістичних операцій. Надвисока швидкість передачі даних, наднизькі затримки та підвищена надійність 5G дозволяють оптимізувати маршрути в режимі реального часу, ефективно управляти автопарком, координувати роботу між пунктами доставки та підтримувати автономні транспортні засоби.

Хоча існують певні технічні виклики та обмеження, пов'язані з розгортанням та використанням 5G, потенційні переваги значно переважають. Майбутні дослідження та розробки в області блокчейн-технологій, машинного навчання, нових бізнес-моделей та енергоефективності можуть додатково розширити можливості децентралізованої доставки "останньої милі" та сприяти створенню більш стійкої та ефективної логістичної екосистеми.

Впровадження 5G в децентралізовану доставку "останньої милі" є важливим кроком до майбутнього логістики, де швидкість, гнучкість та ефективність є ключовими факторами успіху. Подальший розвиток та впровадження цих технологій дозволить не лише задовольнити зростаючі потреби споживачів, але й сприятиме розвитку економіки та покращенню якості життя в цілому.

References

1. Optimization of decentralized last mile delivery using artificial intelligence / Y. Leshchenko et al. XVII MEASUREMENT AND CONTROL IN COMPLEX SYSTEMS (MCCS-2024). Vinnytsia, 2024. URL: <https://doi.org/10.31649/mccs2024.5-06>
2. Siddiqi, Yu, Joung. 5G Ultra-Reliable Low-Latency Communication Implementation Challenges and Operational Issues with IoT Devices. *Electronics*. 2019. Vol. 8, no. 9. P. 981. URL: <https://doi.org/10.3390/electronics8090981>
3. Towards autonomous and safe last-mile deliveries with ai-augmented self-driving delivery robots / E. Shaklab et al. *arXiv preprint*. 2023. URL: <https://doi.org/10.48550/arXiv.2305.17705>
4. A Survey on 5G Usage Scenarios and Traffic Models / J. Navarro-Ortiz et al. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*. 2020. Vol. 22, no. 2. P. 905–929. URL: <https://doi.org/10.1109/comst.2020.2971781>
5. 5G support for Industrial IoT Applications– Challenges, Solutions, and Research gaps / P. Varga et al. *Sensors*. 2020. Vol. 20, no. 3. P. 828. URL: <https://doi.org/10.3390/s20030828>
6. Dai H.-N., Zheng Z., Zhang Y. Blockchain for Internet of Things: A Survey. *IEEE Internet of Things Journal*. 2019. Vol. 6, no. 5. P. 8076–8094. URL: <https://doi.org/10.1109/jiot.2019.2920987>
7. Emerging 5G technology: A review of its far-reaching implications for communication and security / Islam Ahmad Ibrahim Ahmad et al. *World Journal of Advanced Research and Reviews*. 2024. Vol. 21, no. 1. P. 2474–2486. URL: <https://doi.org/10.30574/wjarr.2024.21.1.0346>
8. S. Messaoudi, A. Ksentini and C. Bonnet, "SDN Framework for QoS provisioning and latency guarantee in 5G and beyond," 2023 *IEEE 20th Consumer Communications & Networking Conference (CCNC)*, Las Vegas, NV, USA, 2023, pp. 587-592, URL: <https://doi.org/10.1109/CCNC51644.2023.10059714>