

УДК 004.7:004.9

DOI: 10.31673/2786-8362.2026.019813

Борисенко І.І., к.т.н.; Галай А.Л.;
Гладка М.В., к.т.н.; Гоббязов А.С.;
Хаб'юк Н.С.

ІНФОРМАЦІЙНА ТЕХНОЛОГІЯ ІНТЕГРАЦІЇ ІОТ-ПРИСТРОЇВ У СИСТЕМИ УПРАВЛІННЯ СКЛАДОМ

Borysenko I.I., Halai A.L., Gladka M.V., Hobbiazov A.S., Khabiuk N.S. Information technology of IoT device integration into warehouse management systems. The paper substantiates a theoretical model of an information technology for logistics process automation based on the integration of the Internet of Things (IoT) and autonomous mobile robots (AMR). The author proposes a transition from conventional centralized Warehouse Management Systems (WMS) to a multi-level architecture utilizing edge computing principles. This approach mitigates data latency, resolves the "phantom inventory" issue, and ensures stable processing of high-frequency telemetry in environments with high robotic unit density. The technological stack is based on the Node.js event-driven environment, SQLite local storage, and the Server-Sent Events (SSE) protocol for real-time streaming telemetry. At the hardware level, the system incorporates RFID, BLE, and UWB technologies for high-precision real-time locating (RTLS), alongside the MQTT protocol for reliable machine-to-machine (M2M) interaction. The scientific contribution of the study lies in the development of the "Heat Sort" hybrid algorithm, which combines dynamic stock placement with multi-agent reinforcement learning (MARL). This enables predictive collision avoidance and warehouse space optimization through real-time "heat map" analysis of corridor congestion. The implementation of the proposed technology establishes the framework for creating a warehouse digital twin, automating inventory management, and deploying predictive maintenance systems.

Keywords: IoT, WMS, warehouse logistics, real-time monitoring, edge computing, Node.js, Server-Sent Events, autonomous mobile robots, Heat Sort, multi-agent reinforcement learning

Борисенко І.І., Галай А.Л., Гладка М.В., Гоббязов А.С., Хаб'юк Н.С. Інформаційна технологія інтеграції ІоТ-пристроїв у системи управління складом. В публікації описано теоретичну модель інформаційної технології, що спрощує та автоматизує маршрутизацію і відстеження складських процесів з використанням ІоТ та автономних мобільних роботів (AMR). Проведено комплексне дослідження переваг інтеграції гетерогенних ІоТ-пристроїв у системи управління складом (WMS) на базі багаторівневої клієнт-серверної архітектури. Описані складові системи, зокрема подієво-орієнтоване середовище Node.js, локальна БД SQLite та протокол Server-Sent Events (SSE) для трансляції телеметрії. Наведено приклад роботи системи у вигляді опису алгоритму обробки даних та динамічного розміщення запасів «Heat Sort».

Ключові слова: ІоТ, WMS, складська логістика, моніторинг у реальному часі, периферійні обчислення, Node.js, Server-Sent Events

Вступ

Зростання масштабів електронної комерції та ускладненням ланцюгів постачання логістичним підприємствам необхідно використовувати різні датчики, сканери та обладнання для відстеження товарних запасів. Зокрема, активного впровадження набувають автономні мобільні роботи (AMR). Однак керування цими процесами за допомогою традиційних систем управління складом (WMS) стає дедалі складнішим, оскільки вони здебільшого покладаються на застарілі синхронні протоколи зв'язку наприклад періодичні HTTP-запити. Оскільки складські операції стають інтенсивнішими, виникає часовий розрив між фізичним переміщенням товару та його відображенням у базі даних. Це створює затримки у трансляції телеметрії, що унеможливорює оперативне уникнення колізій на маршрутах техніки. Зі збільшенням кількості товарних позицій на складі складність інтеграції даних у цілісну систему зростає. Відсутність потокового автоматизованого збору інформації та динамічної оптимізації маршрутів ускладнює роботу операторів і менеджерів, уповільнює процеси інвентаризації та призводить до неефективного використання ресурсу акумуляторів парку робототехніки.

Для ґрунтовного розуміння механізмів виникнення інформаційних затримок, необхідно здійснити детальний, поетапний аналіз типового логістичного циклу товару на складі.

© Борисенко І.І., Галай А.Л., Гладка М.В., Гоббязов А.С., Хаб'юк Н.С. 2026

Зазначений цикл охоплює низку ресурсномістких технологічних операцій, серед яких: Приймання (Inbound). Процес розвантаження транспортних засобів, ідентифікації вантажу, перевірки його фактичної відповідності супровідній документації, визначення масо-габаритних характеристик та первинного введення даних в інформаційну систему підприємства. Розміщення (Put-away). Транспортування прийнятого товару із зони приймання до оптимальної стелажної комірки зберігання. Система управління запасами потребує застосування складного алгоритмічного підходу, що враховує логістичні параметри товарів та жорсткі вимоги до їхнього терміну придатності. Впровадження стратегій FIFO/FEFO у синергії з інструментами класифікації ABC/XYZ забезпечує диференційований підхід до реалізації товарів, мінімізуючи ризики псування продукції та оптимізуючи логістичні витрати підприємства. Внутрішні переміщення (Replenishment). Безперервний процес підтримки оптимального рівня запасів у зоні активного відбору (пikінгу) шляхом своєчасного поповнення запасів із зони резервного зберігання - верхніх ярусів стелажів. Комплектування замовлень (Picking). Найбільш трудомісткий, дорогий та критичний процес, на який, згідно з дослідженнями, припадає до 50–60% усіх операційних витрат логістичного комплексу. Цей процес передбачає збір розрізнених товарів з різних комірок відповідно до маршрутного листа замовлення. Пакування та відвантаження (Packing & Outbound). Консолідація зібраних одиниць товару, їх пакування у транспортну тару, маркування логістичними етикетками та завантаження у транспортні засоби кур'єрських служб.

Традиційна, класична модель управління всіма вищезазначеними процесами цілком і повністю спирається на дискретну реєстрацію подій у базі даних. Працівник складу супроводжує абсолютно кожен свою фізичну дію скануванням штрих-кодів або QR-кодів за допомогою спеціалізованого терміналу збору даних ТЗД. Наприклад, переміщуючи коробку, оператор спочатку сканує її штрих-код, потім рухається до цільової комірки, сканує штрих-код комірки, і лише після цього натискає на пристрої кнопку підтвердження транзакції. Застосування зазначеного підходу, який на перший погляд видається надійним, породжує фундаментальну та досі не вирішену проблему сучасних інформаційних систем – критичну латентність даних. Епізодичність обміну даними між матеріальним середовищем та цифровим двійником складу створює умови для виникнення інформаційної асиметрії. Оскільки реєстрація змін у WMS жорстко прив'язана до циклу сканування та HTTP-відповіді сервера, формується період неконтрольованої невизначеності. Даний розрив між фізичною дією та її віртуальним відображенням критично знижує достовірність моніторингу товаропотоків у реальному часі та обмежує ефективність стратегічного планування.

Таким чином, розрив між фізичним переміщенням товару та його відображенням у системі WMS виступає ключовою причиною виникнення «фантомних запасів» та критичних затримок у високонавантажених логістичних комплексах. Дискретність синхронізації даних неминує призводить до системних помилок, що проявляються у формі розсинхронізації між фактичним станом складських запасів та їх цифровим відображенням. Найбільш небезпечним наслідком є ситуація, коли система демонструє наявність товару, який фактично вже вилучено, що зумовлює неефективні переміщення персоналу та техніки, втрату часу та зниження надійності виконання замовлень. Зазначена проблема експоненціально загострюється в умовах інтенсивної інтеграції автономних мобільних роботів (AMR) та автоматизованих керованих транспортних засобів (AGV).

Висока динаміка роботизованих систем вимагає безперервної синхронізації даних, що робить наявні дискретні методи реєстрації критичним бар'єром для ефективної логістики. На відміну від людей, здатних діяти в умовах інформаційної невизначеності, алгоритми робототехніки потребують безперервного обміну точними телеметричними даними. Стандартні WMS-системи, архітектура яких була розроблена понад десятиліття тому, концептуально та технологічно не відповідають вимогам сучасних потоків даних, що ставить під сумнів їхню ефективність у нових умовах автоматизованої логістики.

Аналіз останніх досліджень. Трансформація традиційних складських комплексів у цифровізовані логістичні хаби зумовлює необхідність глибокої інтеграції інструментарію

Індустрії 4.0. Ключова науково-практична задача полягає у створенні кіберфізичного середовища, здатного нівелювати дискретність оновлення даних та забезпечити ізоморфність фізичних потоків і цифрових управлінських контурів. Вагоме місце у сучасних наукових публікаціях посідають питання ефективної передачі даних у таких системах. У зв'язку зі стрімким розвитком Інтернету речей (IoT) дослідження фокусуються на розробленні та застосуванні легковагових протоколів зв'язку, які мінімізують навантаження на серверну інфраструктуру.

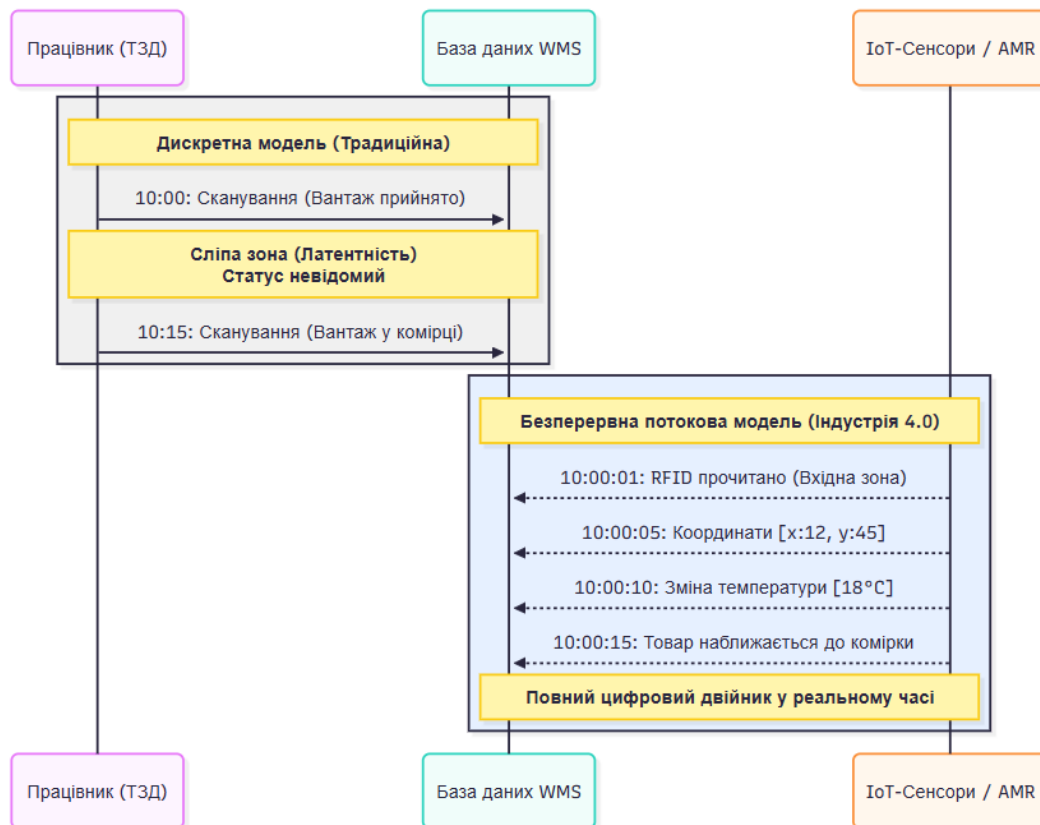


Рис. 1. Порівняльний аналіз дискретної моделі збору даних за допомогою ТЗД та безперервної потокової моделі на базі IoT-технологій

У роботах цього напрямку також розглядаються переваги інтеграції інформаційних систем, зокрема підвищення точності інвентаризації, оптимізація маршрутів складської техніки та зменшення операційних витрат. Водночас окреслюються й суттєві бар'єри впровадження, серед яких ключовим є перевантаження мереж унаслідок генерації великих обсягів «сирих» телеметричних даних. На цьому тлі особливої актуальності набуває аналіз існуючих систем управління складом WMS та їхніх архітектурних обмежень у контексті інтеграції з IoT-середовищем. Ринок WMS пройшов тривалий еволюційний шлях від простих облікових систем до комплексних платформ класу Supply Chain Execution, що забезпечують координацію логістичних процесів на рівні підприємства. Проте сучасні виклики Індустрії 4.0 формують нові вимоги до функціональності таких систем. Інформаційна система має не лише фіксувати результати виконання бізнес-процесів, але й забезпечувати керування фізичними об'єктами, зокрема роботизованими системами, конвеєрами та інтелектуальними елементами складської інфраструктури, у реальному часі. Сучасна парадигма автоматизації складів вимагає описативного аналізу архітектурної побудови WMS з метою виявлення структурних дефіцитів, що перешкоджають їхній еволюції. Перспективним вектором розвитку є розроблення гнучких архітектурних фреймворків, здатних забезпечувати безшовну інтеграцію з кіберфізичним середовищем та оперативно оперувати динамічними масивами потокової інформації. Наведений аналіз свідчить про необхідність принципово нової архітектури, яка поєднує переваги периферійних обчислень з подієво-орієнтованим програмним ядром.

Постановка завдання. Незважаючи на значні успіхи в автоматизації, критичним залишається розрив між інтенсивністю генерації телеметричних даних гетерогенними групами AMR та пропускною здатністю традиційних централізованих архітектур WMS. Проблема обробки масивів Big Data в умовах реального часу призводить до деградації продуктивності систем та зростання латентності мережевого трафіку. Додатковим науковим викликом є незначна кількість моделей динамічного планування траєкторій, які б інтегрували стохастичні фізичні параметри обладнання (деградація енергоносіїв, зношеність механізмів) та адаптивні алгоритми реконфігурації топології складських запасів відповідно до коливань інтенсивності запитів. Фізичний та апаратний рівні Інтернету речей у контексті складських кіберфізичних систем: Перехід до парадигми Індустрії 4.0 та побудова повноцінного «цифрового двійника» (Digital Twin) складу неможливі без розгортання надійної, високоточної та відмовостійкої апаратної інфраструктури, яка виступає фундаментальним джерелом генерації первинних даних (телеметрії). У контексті розроблення інформаційної системи управління складськими процесами критично важливо враховувати фізичну природу даних, що надходять до програмного ядра WMS, а також технологічні обмеження сенсорних мереж. Фізичний рівень (Physical Layer) сучасного IoT-орієнтованого складу формується гетерогенним масивом пристроїв, які доцільно класифікувати за функціональним призначенням на системи ідентифікації, системи просторового позиціонування (RTLS) та системи моніторингу середовища. Технології безконтактної ідентифікації об'єктів базуються на використанні радіочастотної ідентифікації RFID, яка поступово витісняє традиційне оптичне штрихкодування, що потребує прямої видимості Line-of-Sight між сканером і етикеткою. У сучасній логістиці стандартом де-факто є застосування пасивних міток стандарту EPC Class1 Gen2, що функціонують в ультрависокочастотному діапазоні UHF, 860–960 МГц. Ключовою перевагою RFID є можливість масового антиколізійного зчитування: сучасні зчитувачі, встановлені на воротах складських доків, здатні за частки секунди ідентифікувати значну кількість міток на палетах, що переміщуються. Кожна мітка містить унікальний електронний код продукту (EPC), який система WMS асоціює з конкретною номенклатурною позицією, партією та терміном придатності в базі даних. Водночас використання RFID супроводжується генерацією значного обсягу надлишкових даних у вигляді повторних зчитувань, ефект «блукаючого читання», що зумовлює необхідність реалізації алгоритмів фільтрації, зокрема методів ковзного вікна (Sliding Window), на рівні периферійних обчислень (Edge Computing).

Системи локального позиціонування в реальному часі (RTLS) застосовуються для відстеження рухомих об'єктів у межах складських приміщень, де використання глобальних навігаційних систем є неможливим. Серед найбільш поширених технологій виділяють BLE (Bluetooth Low Energy) та UWB (Ultra-Wideband). BLE-маячки характеризуються низьким енергоспоживанням і використовуються разом із мережею стаціонарних приймачів для визначення координат об'єктів на основі рівня потужності сигналу (RSSI). Натомість технологія UWB забезпечує значно вищу точність позиціонування до десятків сантиметрів завдяки вимірюванню часу проходження радіосигналу (Time of Flight), що є критично важливим для реалізації алгоритмів високоточної маршрутизації. Моніторинг параметрів середовища є необхідною складовою функціонування складів, що працюють із товарами категорій FMCG, Fresh або фармацевтичною продукцією. Для цього застосовуються датчики температури, вологості та концентрації CO₂. На відміну від традиційних дротових систем, сучасні IoT-рішення базуються на використанні бездротових технологій із низьким енергоспоживанням, таких як LPWAN або Zigbee, що значно спрощує масштабування інфраструктури. Вибір MQTT як базового протоколу обміну даними між периферійними пристроями та центральною системою управління зумовлений його низькою ресурсомісткістю порівняно з HTTP. Архітектурна специфіка MQTT дозволяє мінімізувати об'єм трафіку та забезпечити континуальність потоків даних. Можливість диференціації рівнів QoS гарантує пріоритетність доставки критичних телеметричних пакетів, підвищуючи загальну відмовостійкість кіберфізичної системи складу в умовах високої динаміки та

потенційних розривів з'єднання. Отже, різноманітність джерел даних і висока інтенсивність їх генерації на фізичному рівні обґрунтовують необхідність використання децентралізованих підходів до оброблення інформації, зокрема архітектури Edge Computing, у поєднанні з високопродуктивними програмними середовищами для побудови ефективних систем управління складськими процесами.

Метою роботи є вирішення вищезгаданих проблем та розробка архітектурної моделі керування складськими процесами, яка використовує технологію Інтернету речей (IoT) та концепцію периферійних обчислень (Edge Computing) для фільтрації даних. Ця модель, побудована з використанням асинхронного середовища виконання та односпрямованих потоків даних, дозволяє мінімізувати навантаження на центральну систему WMS та забезпечити моніторинг у реальному часі без критичних затримок.

Виклад основного матеріалу дослідження

IoT-системи все більше приходять у логістичну галузь; ми можемо побачити автоматизовані сортувальні лінії, автономних мобільних роботів (AMR) та розумні стелажі. З ростом популярності логістичних IoT-екосистем виникла потреба в надійних інструментах зв'язку між фізичним світом та програмним ядром WMS. Пряма передача даних від цих пристроїв до центральної бази вимагає широких каналів зв'язку та потужних серверів, особливо коли мова йде про безперервний моніторинг. Для вирішення даних проблем була розроблена архітектура системи, яка використовує Edge-шлюзи та значно спрощує обробку телеметрії, а також дає змогу оперативно реагувати на нештатні ситуації, наприклад критичний розряд батареї робота. Як оптимальне середовище для реалізації серверної логіки обрано платформу Node.js, яка завдяки подієво-орієнтованій архітектурі (Event Loop) ефективно обробляє тисячі одночасних з'єднань. У якості локального сховища даних на рівні Edge-сервера використовується легковагова реляційна база даних SQLite, що гарантує швидкість виконання CRUD-операцій без необхідності розгортання складних кластерів баз даних. Загальна архітектура поділяється на такі рівні:

Рівень сприйняття (Perception Layer). Включає фізичні датчики, сенсори позиціонування AMR, системи моніторингу заряду та локальні мікроконтролери.

Мережевий рівень (Network Layer). Базується на використанні IoT-шлюзів (Edge Computing), які виконують роль локальних обчислювальних центрів на базі середовища Node.js та бази SQLite.

Рівень додатку (Application Layer). Ядро WMS та диспетчерські інтерфейси, взаємодія з якими відбувається через протокол SSE (Server-Sent Events).

Обґрунтування вибору технологічного стека для реалізації системи. Для забезпечення високої продуктивності системи в умовах інтенсивних потоків телеметрії та вимог реального часу важливо не лише визначити загальну архітектуру, але й обґрунтувати вибір конкретних технологій. Розроблення програмного забезпечення для управління складськими кіберфізичними системами висуває специфічні вимоги до технологічного стека: висока пропускна здатність, мінімальні затримки оброблення даних, ефективне використання обчислювальних ресурсів та здатність до масштабування. Для реалізації серверної частини системи як на рівні периферійних вузлів (Edge), так і на рівні центрального ядра WMS доцільним є використання подійно-орієнтованого середовища виконання Node.js. На відміну від традиційних багатопотокових серверних платформ, які виділяють окремий системний потік для кожного мережевого підключення та стикаються з проблемою надмірного споживання ресурсів зокрема відомою як проблема C10k, Node.js реалізує однопотокову модель із використанням циклу подій (Event Loop) та неблокуючого асинхронного введення-виведення. Завдяки цьому оброблення великої кількості одночасних запитів здійснюється без створення додаткових потоків, що забезпечує високу ефективність використання оперативної пам'яті та процесорного часу. Такий підхід є особливо релевантним для систем, орієнтованих на оброблення поточкових даних у режимі реального часу. На рівні периферійних обчислень важливим є забезпечення локального зберігання та попереднього оброблення даних.

Використання повноцінних клієнт-серверних систем керування базами даних у таких умовах є недоцільним через їхню ресурсоємність і складність адміністрування. У цьому контексті оптимальним рішенням є застосування вбудованої реляційної бази даних SQLite. Вона функціонує як бібліотека, інтегрована безпосередньо в застосунок, і зберігає дані у єдиному файлі, що повністю усуває мережеві затримки. Підтримка режиму WAL (Write-Ahead Logging) дозволяє ефективно обробляти конкурентні операції запису телеметрії. Забезпечення відображення актуального стану складських процесів у клієнтських застосунках, зокрема у вигляді дашбордів або диспетчерських панелей, потребує організації безперервної передачі даних від сервера до клієнта. Використання традиційного HTTP-поллінгу в цьому випадку є неефективним через значні накладні витрати та затримки. Хоча протокол WebSockets забезпечує повнодуплексний канал зв'язку, його застосування не є оптимальним для сценаріїв, де переважає односторонній потік даних від сервера до клієнта. У зв'язку з цим обґрунтованим є використання технології SSE, яка реалізує ефективний механізм односпрямованої передачі поточкових даних поверх стандартного HTTP-з'єднання. Такий підхід дозволяє мінімізувати накладні витрати на встановлення та підтримку з'єднань, забезпечуючи при цьому своєчасне оновлення клієнтського інтерфейсу. Це є ключовою передумовою для реалізації концепції «цифрового двійника» складу в реальному часі. Таким чином, обраний технологічний стек, що поєднує подійно-орієнтоване середовище Node.js, вбудовану базу даних SQLite та механізми потокової передачі даних на основі SSE, забезпечує необхідний рівень продуктивності, масштабованості та надійності для побудови сучасної інформаційної системи управління складськими процесами в умовах Індустрії 4.0.

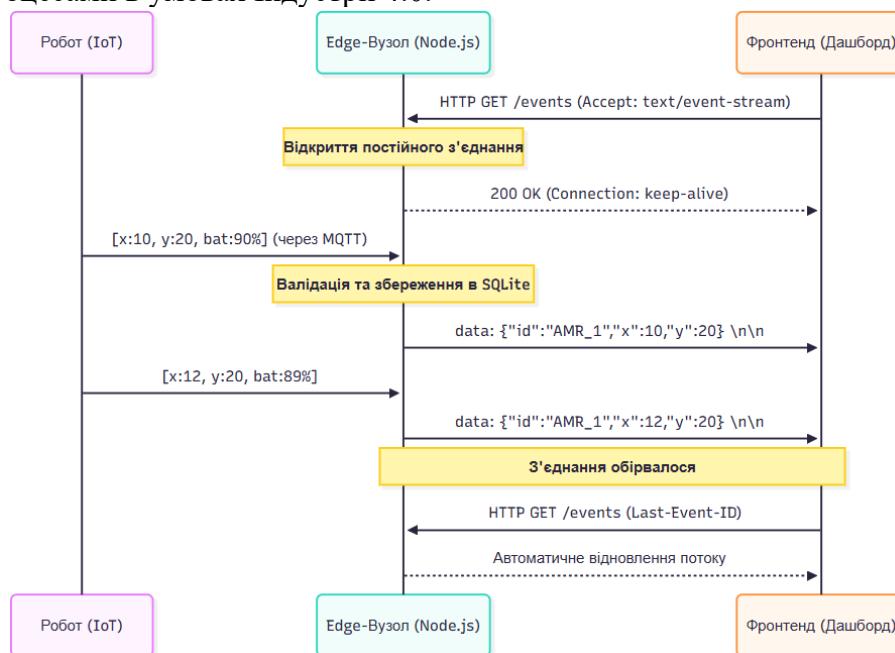


Рис. 2. Механізм односпрямованої трансляції поточкових подій за протоколом SSE від сервера до клієнта

Невіддільною складовою інформаційної технології є теоретична модель алгоритму оптимізації «Heat Sort». Цей алгоритм динамічно кластеризує запаси: товари з високою частотою замовлень (гарячі) алгоритмічно розміщуються роботами у ближніх зонах до точок комплектації, тоді як менш затребувані товари (холодні) переміщуються углиб складу. Передбачається, що система буде автоматично реєструвати переміщення товарів без участі оператора. Загальний алгоритм налаштування та роботи системи при обробці події виглядає наступним чином: Збір даних. Мікроконтролер робота генерує масив "сирих" сигналів (Raw Data) про поточні координати та метрики зносу. Обробка на периферії (Edge Computing). IoT-шлюз отримує масив сигналів та фільтрує їх для мінімізації навантаження. Маршрутизація. Ядро Node.js оновлює позицію у SQLite та розраховує наступну ціль для робота за алгоритмом

«Heat Sort», враховуючи залишковий заряд акумулятора. Передача даних. Інформація про статус системи та оновлені координати транслюється диспетчеру через односпрямований канал SSE, що гарантує низьку латентність. Відповідно до описаного алгоритму роботи, інформаційна система здатна обробляти дані про рух роботів з мінімальною затримкою, розвантажуючи при цьому центральну мережу.

Моделі інтелектуальної маршрутизації складської техніки. Для ефективного функціонування системи недостатньо лише збирати та передавати телеметрію – критично важливо забезпечити інтелектуальне управління рухом великої кількості автономних мобільних роботів (AMR) в динамічному складському середовищі. Класичні алгоритми маршрутизації, такі як Дейкстри чи A^* , добре працюють для статичних умов, проте виявляються недостатніми при одночасній роботі десятків або сотень роботів. При одночасній роботі десятків або сотень одиниць техніки на обмеженій площі складу традиційні алгоритми маршрутизації не справляються. На вузьких перехрестях виникають затори та взаємне блокування (deadlocks), коли роботи перекривають шлях один одному. Глобальний сервер WMS не здатен миттєво перераховувати маршрути для сотень агентів при кожній зміні середовища, що обґрунтовує необхідність децентралізованих інтелектуальних підходів. Для розв'язання цієї проблеми в архітектуру системи пропонується інтегрувати модуль динамічної адаптивної маршрутизації на основі багатоагентного навчання з підкріпленням MARL (Multi-Agent Reinforcement Learning) та авторської евристичної моделі обходу перешкод, умовно названої «Heat Sort» (теплове сортування). У рамках цієї парадигми кожен автономний робот розглядається як незалежний інтелектуальний агент. Модель функціонує за принципом динамічного аналізу векторної «Heat Map» (теплової карти) загальної завантаженості логістичних коридорів складу. Функція математичної корисності для кожного агента базується на системі стимулів та штрафів (Q-learning). Агент отримує високу позитивну математичну оцінку (винагороду) за максимально швидкою доставкою свого вантажу до цільової комірки.

Якщо декілька автономних роботів одночасно наближаються до вузького міжстелажного проїзду, локальний Edge-вузол миттєво аналізує поточну густину трафіку. Він виявляє «червону зону» - зону з високим ступенем теплового завантаження і проактивно, в частки секунди, перераховує вектор руху для частини машин, скеровуючи їх альтернативними, вільнішими коридорами. Застосування парадигми Edge-обчислень у багатоагентних логістичних системах виступає ключовим інструментом мінімізації латентності та подолання асинхронності між фізичними та цифровими процесами. Завдяки локальній обробці даних роботи-агенти отримують можливість здійснювати миттєві реакції на непередбачувані динамічні перешкоди, не очікуючи відповіді від глобального хмарного ядра WMS, яке часто функціонує з високим навантаженням.

Таким чином, Edge-архітектура забезпечує безперервність інформаційних потоків та знижує ризик виникнення критичних затримок у системах з великою кількістю автономних мобільних агентів. Це дозволяє підтримувати стабільність маршрутизації та підвищує загальний рівень надійності складських операцій в умовах інтенсивної автоматизації.

Математичне моделювання алгоритмів інтелектуальної маршрутизації на базі MARL та евристичного підходу «Heat Sort». Управління багатоагентною системою автономних мобільних роботів (AMR) у замкнутому просторі складу є класичною NP-складною задачею оптимізації. Для її розв'язання в архітектуру системи впроваджується модуль динамічної маршрутизації на принципах багатоагентного навчання з підкріпленням MARL та моделі обходу перешкод «Heat Sort».

Для забезпечення високої точності обчислень топологія складського комплексу формалізується у вигляді орієнтованого графа $G = (V, E)$, де множина вершин $V = \{\mu_1, \mu_2, \dots, \mu_n\}$ представляє можливі фізичні позиції, комірки координатної сітки складу, а множина ребер E відображає наявні шляхи переміщення між цими позиціями. Кожне ребро $e_{ij} \in E$ має базову вагу w_{ij} , що відповідає фізичній відстані або часу проїзду за відсутності перешкод.

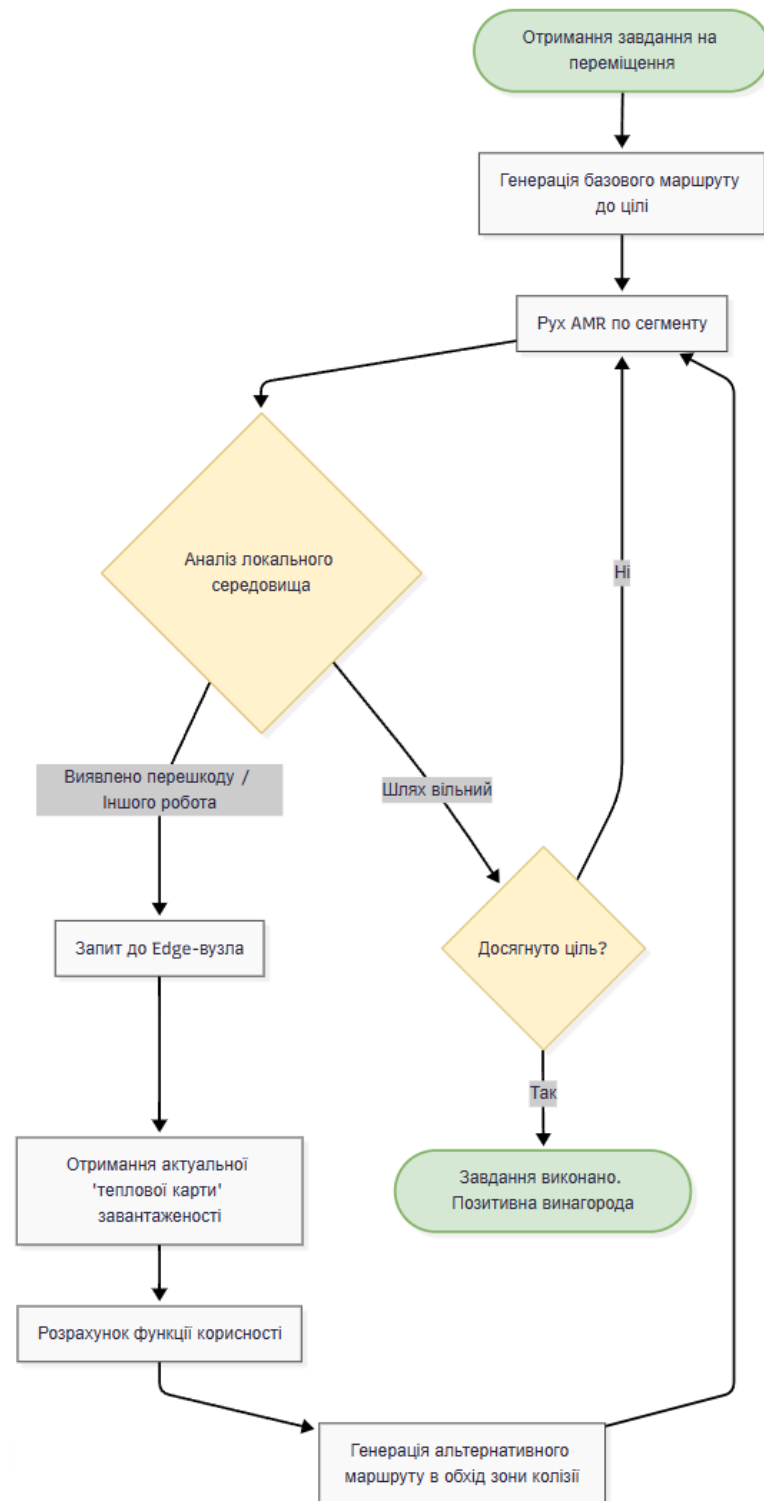


Рис. 3. Блок-схема логіки прийняття рішень під час функціонування модуля багатоагентної маршрутизації, модель "Heat Sort"

Головним завданням модуля маршрутизації на Edge-вузлі є максимізація кумулятивної сумарної винагороди для всього флоту. Агент навчається приймати рішення, оновлюючи функцію цінності дії – Q-функцію, згідно з класичним рівнянням Беллмана (Bellman Equation):

$$Q(s_t, a_t) \leftarrow Q(s_t, a_t) + \alpha [R_{\{t+1\}} + \gamma \max_{\{a\}} Q(s_{\{t+1\}}, a) - Q(s_t, a_t)]$$

де α – швидкість навчання (learning rate), яка визначає, наскільки сильно нова інформація перевизначає стару.

Модифікація функції винагороди на основі евристики "Heat Sort". Класичний алгоритм MARL вимагає значних обчислювальних ресурсів та тривалого часу на збіжність

(convergence). Для адаптації моделі під жорсткі вимоги реального часу та обчислювальні потужності локальних Edge-вузлів Raspberry Pi або промислових ПК, в математичну модель імплементовано евристичний механізм «Heat Sort» (Теплового сортування).

Механізм функціонує шляхом динамічної модифікації графа G . Глобальна система збирає поточні координати всіх роботів і формує матрицю щільності трафіку (Heat Map). Кожній вершині графа $\mu_i \in V$ в режимі реального часу присвоюється динамічний індекс «температури» - теплового навантаження $H(\mu_i, t)$, який розраховується як:

$$H(v_i, t) = \sum_{k=1}^K \frac{1}{d(v_i, pos_k)^2 + \epsilon}$$

де: K – загальна кількість активних агентів у секторі, $d(v_i, pos_k)$ – евклідова відстань від вершини v_i до поточної позиції агента k , а ϵ – мала константа для уникнення ділення на нуль.

Чим більше роботів одночасно наближається до вузького перехрестя, тим вищим стає його теплове значення H . Цей індекс інтегрується у функцію винагороди R та безпосередньо впливає на вагу ребер під час пошуку альтернативного шляху. Якщо $H(v_i, t)$ перевищує критичний поріг $\theta_{critical}$, Edge-вузол штучно підвищує вагу проїзду через цю вершину до нескінченності, змушуючи алгоритми планування, наприклад локальний A^* на самому роботі негайно перераховувати вектор руху в обхід «гарячої» зони затору.

Такий гібридний математичний підхід використання глобальної матриці щільності + локального децентралізованого Q-навчання дозволяє системі уникати ефектів нескінченного зациклення агентів (deadlocks). При цьому обчислювальна складність алгоритму переноситься з глобального хмарного сервера WMS на шар периферійних обчислень, що гарантує час генерації нового маршруту в межах мілісекунд, забезпечуючи безперебійний рух кіберфізичної системи складу.

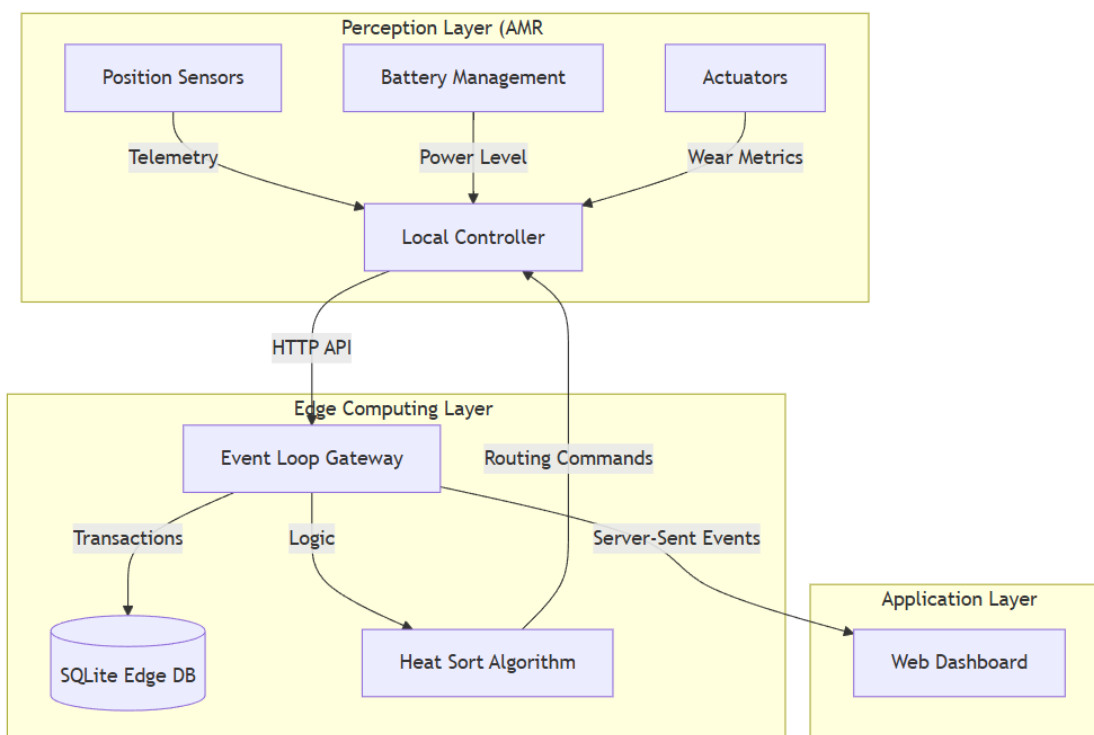


Рис. 4. Архітектура інформаційної технології інтеграції автономних мобільних роботів AMR на базі периферійних обчислень

Висновки

Проведене дослідження показало, що інтеграція IoT-пристроїв може надати значні переваги при використанні в інформаційних системах для керування складом WMS. Результати підкреслюють, що використання архітектури з периферійними обчисленнями

(Edge Computing), базою даних SQLite та технологією трансляції подій SSE дозволяє вирішити проблему великих даних (Big Data) у логістиці.

Використовуючи потужність автоматизованого збору телеметрії, логістичні комплекси можуть з більшою точністю відстежувати свої парки AMR, дозволяючи їм оптимізувати використання площ та уникати простоїв обладнання завдяки предиктивному моніторингу заряду батарей. Загалом, інтеграція IoT-технологій має величезні перспективи для революції в управлінні складськими процесами.

Подальші дослідження будуть спрямовані на розробку алгоритмів предиктивного аналізу та застосування методів машинного навчання для прогнозування оптимального розміщення товарів на основі зібраних масивів даних.

Список використаної літератури:

1. Industry 4.0 in Logistics and Supply Chain Management: A Systematic Literature Review. // Engineering Management Journal, 2021.
2. The Use of MQTT and SSE in IoT Systems: A Survey. // IEEE Access, 2020.
3. Digital Twin in Logistics: A Review of Definitions, Properties, and Application Scenarios. // Logistics Journal, 2021.
4. Warehouse Management System and IoT Integration for Intelligent Logistics. // International Journal of Applied Mathematics, Electronics and Computers, 2022.
5. Internet of Things for Smart Warehousing: A Comprehensive Review. // IEEE Internet of Things Journal, 2023.
6. Кравченко В.І., Борисенко І.І., Голубенко О.І., Яковець В.П., Хаб'юк Н.С., Дослідження ефективності сигналу OFDM в мобільних мережах останніх поколінь при впливі завад. ISSN 2786-8362 Наукові записки ДУІКТ – 2025. – №2 (8) С. 61-67.
7. Галаган Н., Борисенко І., Хаб'юк, Н., Стародубцев Я., & Ковальчук Н. Концептуальна модель організаційно-технічної системи кіберзахисту iot-платформ. Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах №2, публікація 21.05.2025 С. 226-231
8. M. Gladka, O. Kuchansky, M. Kostikov, and R. Lisnevskyi. Method of allocation of labor resources for IT project based on expert assessments of Delphi. SIST 2023 - 2023 IEEE International Conference on Smart Information Systems and Technologies, Proceedings, 2023, pp. 545–551, doi: 10.1109/SIST58284.2023.10223549.

Автори статті

Борисенко Ірина – кандидат технічних наук, доцент, Київський національний університет імені Тараса Шевченка, Київ, Україна.

ORCID: 0009-0001-8582-3126

Галай Антон – студент, Київський національний університет імені Тараса Шевченка, Київ, Україна.

ORCID: 0009-0009-1676-9037

Гладка Мирослава – кандидат технічних наук, доцент, Київський національний університет імені Тараса Шевченка, Київ, Україна.

ORCID: 0000-0001-5233-2021

Гоббязов Андрій – аспірант, Державний університет інформаційно-комунікаційних технологій, Київ, Україна.

ORCID: 0009-0005-6605-8808

Хаб'юк Наталія – старший викладач, Державний університет інформаційно-комунікаційних технологій, Київ, Україна.

ORCID: 0009-0005-7917-5528

Authors of the article

Borysenko Iryna – Candidate of Sciences (technical), Associate Professor, Taras Shevchenko National University of Kyiv, Kyiv, Ukraine.

ORCID: 0009-0001-8582-3126

Halai Anton – student, Taras Shevchenko National University of Kyiv, Kyiv, Ukraine.

ORCID: 0009-0009-1676-9037

Gladka Myroslava – Candidate of Sciences (technical), Associate Professor, Taras Shevchenko National University of Kyiv, Kyiv, Ukraine.

ORCID: 0000-0001-5233-2021

Hobbiyazov Andrii – postgraduate, State University of Information and Communication Technologies, Kyiv, Ukraine.

ORCID: 0009-0005-6605-8808

Khabiuk Nataliia – senior lecturer, State University of Information and Communication Technologies, Kyiv, Ukraine.

ORCID: 0009-0005-7917-5528

Надійшла до редакції: 16.04.2026

Прийнята до друку: 27.04.2026

Опубліковано: 25.05.2026

© 2026 Борисенко І.І., Галай А.Л., Гладка М.В., Гоббязов А.С., Хаб'юк Н.С.

Цей матеріал ліцензовано за умовами CC BY 4.0. <https://creativecommons.org/licenses/by/4.0>