НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ
ІМЕНІ ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»

Навчально-науковий інститут телекомунікаційних систем

Кафедра інформаційних технологій в телекомунікаціях

До захисту допущено:
В.О. завідувача кафедри
_____ Валерій ПРАВИЛО
«_____»_____2026 р.

ДИПЛОМНА РОБОТА
на здобуття ступеня бакалавра

за освітньо-професійною програмою «Інформаційно-комунікаційні технології»
спеціальності 172 Телекомунікації та радіотехніка

на тему: Модифікована архітектура системи інтернету речей для логістичних перевезень

Виконав: здобувач вищої освіти 4 курсу, групи ТІ-21
Ященко Матвій Васильович _____

Науковий керівник: старший викладач кафедри ІТТ НН ІТС,
Курдеча Василь Васильович _____

Рецензент: професор кафедри телекомунікацій НН ІТС,
кандидат технічних наук,
професор Якорнов Євгеній Аркадійович. _____

Засвідчую, що у цій дипломній роботі немає запозичень з праць інших авторів без відповідних посилань.
Здобувач вищої освіти _____

Київ – 2026 року

НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ
ІМЕНІ ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»

Навчально-науковий інститут телекомунікаційних систем

Кафедра інформаційних технологій в телекомунікаціях

Рівень вищої освіти – перший (бакалаврський)
Освітньо-професійна програма «Інформаційно-комунікаційні технології»
спеціальності 172 Телекомунікації та радіотехніка

ЗАТВЕДЖУЮ
В.О. завідувача кафедри
_____ Валерій ПРАВИЛО
«_____»_____2026 р.

ЗАВДАННЯ
на дипломну роботу студенту
Ященку Матвію Васильовичу

1. Тема дипломної роботи: Модифікована архітектура системи інтернету речей для логістичних перевезень, науковий керівник роботи старший викладач кафедри ІТТ НН ІТС, Курдеча Василь Васильович - затверджені наказом по університету від 26.05.2026 р. №1912-с

2. Строк подання студентом дипломної роботи 06.06.2026 р.
3. Об’єкт дослідження: Спостереження у реальному часі за посилками під час перевезення.

4. Вихідні дані до роботи: Технології бездротового зв'язку малого радіусу дії та стільникового зв'язку для IoT-систем, моделі розповсюдження радіосигналу у середовищах із завадами, методи оцінювання енергоефективності та масштабованості IoT-архітектур, міжнародні стандарти інформаційної безпеки та обміну даними в системах Інтернету речей.

5. Перелік завдань, які потрібно розробити:

Проаналізувати існуючі проблемні питання у сфері логістичних перевезень. Проаналізувати існуючі рішення у сфері логістичних перевезень.

Модифікувати архітектуру системи інтернету речей для відстеження стану посилок та збору даних.

Оцінити ефективність запропонованого рішення.

Розробити рекомендації для застосування модифікованої архітектури

6. Перелік ілюстративного матеріалу: 20 слайдів

7. Дата видачі завдання: 23.02.2026 р.

Календарний план

№ з/п	Назва етапів виконання дипломної роботи	Термін виконання етапів дипломної роботи	Примітка
1	Узгодження організаційних питань з науковим керівником	24.02.26-03.03.26	Виконано
2	Узгодження теми роботи та початок роботи над першим розділом	03.03.26-10.03.26	Виконано
3	Робота над першим розділом	10.03.26-24.03.26	Виконано
4	Робота над другим розділом	24.03.26-21.04.26	Виконано
5	Робота над третім розділом	21.04.26 - 12.05.26	Виконано
6	Робота над четвертим розділом	12.05.26 - 26.05.26	Виконано
7	Оформлення дипломної роботи	26.05.26 - 06.06.26	Виконано
8	Підготовка презентації до захисту	07.06.26 - 16.06.26	

Здобувач вищої освіти _____ Матвій ЯЩЕНКО

Науковий керівник роботи _____ Василь КУРДЕЧА

РЕФЕРАТ

Дипломна робота «Модифікована архітектура системи інтернету речей для логістичних перевезень» містить 75 сторінок тексту, 20 рисунків та 5 таблиць, 1 додаток, а також використовує 26 літературних джерел посилання.

Актуальність теми: Сучасна логістична галузь стикається зі зростаючими вимогами щодо швидкості, прозорості та якості перевезень: щорічні втрати від пошкоджень вантажів, порушень температурного режиму та несанкціонованого втручання сягають 3–8 % обороту логістичних компаній. Розробка модифікованої архітектури IoT-системи моніторингу, яка одночасно забезпечує спостереження за окремою посилкою, оперативність реагування на інциденти та економічну прийнятність для масового застосування, є актуальним науково-прикладним завданням, що відповідає сучасним потребам логістичної галузі.

Мета роботи полягає в покращенні якості логістичних перевезень з допомогою технології інтернету речей. Для досягнення поставленої мети розробляється модифікована архітектура системи моніторингу стану вантажів, яка забезпечує оперативний контроль кожної окремої посилки в режимі реального часу за прийнятних експлуатаційних витрат.

Об'єктом дослідження є спостереження у реальному часі за посилками під час перевезення. Воно охоплює процеси збору, передачі та обробки телеметричних даних про стан кожної одиниці вантажу для оперативного виявлення критичних подій.

Предметом дослідження є система інтернету речей для логістичних перевезень. Розглядаються її архітектурна організація, склад апаратних та програмних компонентів, а також механізми забезпечення енергоефективності, масштабованості та інформаційної безпеки.

Методами дослідження є системний аналіз, методи структурно-функціонального моделювання, аналітичне моделювання радіоканалу, методи оцінювання енергоспоживання та інформаційного навантаження, а також порівняльний аналіз технічних і економічних показників.

Запропоноване рішення забезпечує оперативний моніторинг кожної окремої одиниці вантажу в режимі реального часу при економічно прийнятному рівні витрат, що дозволяє підвищити прозорість логістичних перевезень, скоротити втрати від невиявлених інцидентів та забезпечити масштабоване впровадження системи в реальній логістичній галузі.

Ключові слова: ІНТЕРНЕТ РЕЧЕЙ, ЛОГІСТИЧНІ ПЕРЕВЕЗЕННЯ, МОНІТОРИНГ ВАНТАЖІВ, BLUETOOTH LOW ENERGY, ІНТЕЛЕКТУАЛЬНИЙ ШЛЮЗ, МОДИФІКОВАНА АРХІТЕКТУРА.

ABSTRACT

The diploma thesis "Modified Architecture of an Internet of Things System for Logistic Transportation" contains 75 pages of text, 20 figures and 5 tables and uses 26 literary reference sources.

Relevance of the topic: The modern logistics industry faces growing demands regarding the speed, transparency and quality of transportation: annual losses from cargo damage, temperature regime violations and unauthorized interference reach 3–8 % of the turnover of logistics companies. The development of a modified architecture of an IoT monitoring system, which simultaneously ensures observation of an individual parcel, responsiveness to incidents and economic affordability for mass application, is a relevant scientific and applied task that meets the modern needs of the logistics industry.

The aim of the work is to improve the quality of logistic transportation by means of Internet of Things technology through the development of a modified architecture of a cargo state monitoring system, which ensures operational control of each individual unit of cargo in real time at a lower level of costs.

The object of research is real-time observation of parcels during transportation, which covers the processes of collecting telemetric data on the state of each unit of cargo, their transmission and processing for the operational detection of critical events.

The subject of research is the Internet of Things system for logistic transportation, its architecture, the composition of hardware and software components, data exchange protocols and mechanisms for ensuring energy efficiency, scalability and information security.

The research methods are systems analysis, methods of structural and functional modeling, analytical modeling of the radio channel, methods of evaluating energy consumption and information load, as well as comparative analysis of technical and economic indicators.

The proposed solution provides operational monitoring of each individual unit of cargo in real time at an economically acceptable level of costs, which allows increasing the transparency of logistic transportation, reducing losses from undetected incidents and ensuring scalable implementation of the system in the real logistics industry.

Keywords: INTERNET OF THINGS, LOGISTIC TRANSPORTATION, CARGO MONITORING, BLUETOOTH LOW ENERGY, INTELLIGENT GATEWAY, MODIFIED ARCHITECTURE.

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ, СКОРОЧЕНЬ І ТЕРМІНІВ

AES — Advanced Encryption Standard (стандарт симетричного шифрування)

AFH — Adaptive Frequency Hopping (адаптивне частотне перестрибування)

API — Application Programming Interface (програмний інтерфейс застосунку)

BAP — Battery-Assisted Passive (напівпасивна RFID-мітка з автономним живленням)

BLE — Bluetooth Low Energy (бездротова технологія малого радіусу дії з низьким енергоспоживанням)

CAN — Controller Area Network (мережева шина транспортного засобу)

CAPEX — Capital Expenditure (капітальні витрати)

Coded PHY — режим фізичного рівня BLE з прямою корекцією помилок

EDI — Electronic Data Interchange (електронний обмін даними)

ERP — Enterprise Resource Planning (система планування ресурсів підприємства)

ETA — Estimated Time of Arrival (розрахунковий час прибуття)

FDA — Food and Drug Administration (Управління з контролю якості харчових продуктів і медикаментів США)

GDP — Good Distribution Practice (належна практика дистрибуції)

GNSS — Global Navigation Satellite System (глобальна навігаційна супутникова система)

GPS — Global Positioning System (глобальна система позиціонування)

HMAC — Hash-based Message Authentication Code (код автентифікації повідомлення на основі геш-функції)

IoT — Internet of Things (Інтернет речей)

JSON — JavaScript Object Notation (текстовий формат обміну даними)

JWT — JSON Web Token (токен автентифікації на основі JSON)

LTE — Long-Term Evolution (стандарт мобільного зв'язку четвертого покоління)

LTE Cat-M — енергоефективна модифікація LTE для IoT-застосувань

M2M — Machine-to-Machine (зв'язок між пристроями без участі людини)

MEMS — Micro-Electro-Mechanical Systems (мікроелектромеханічні системи)

MQTT — Message Queuing Telemetry Transport (протокол обміну повідомленнями для IoT)

mTLS — Mutual Transport Layer Security (взаємна автентифікація сторін за TLS)

NB-IoT — Narrowband IoT (вузькосмугова технологія стільникового зв'язку для IoT)

NFC — Near Field Communication (бездротовий зв'язок ближнього радіусу)

OPEX — Operational Expenditure (операційні витрати)

OTA — Over-The-Air (бездротове оновлення програмного забезпечення)

PHY — Physical Layer (фізичний рівень моделі OSI)

PSK — Pre-Shared Key (попередньо розподілений ключ)

QoS — Quality of Service (якість обслуговування)

RBAC — Role-Based Access Control (контроль доступу на основі ролей)

REST — Representational State Transfer (архітектурний стиль програмних інтерфейсів)

RFID — Radio-Frequency Identification (радіочастотна ідентифікація)

SHA — Secure Hash Algorithm (алгоритм криптографічного гешування)

SIM — Subscriber Identity Module (модуль ідентифікації абонента)

SoC — System on Chip (однокристальна обчислювальна система)

TCO — Total Cost of Ownership (сумарна вартість володіння)

TLS — Transport Layer Security (протокол захисту транспортного рівня)

TMS — Transport Management System (система управління перевезеннями)

WMS — Warehouse Management System (система управління складом)

Edge Computing — концепція межових обчислень, за якої первинна обробка даних виконується безпосередньо на пристрої або проміжному шлюзі, а не у хмарі.

Path Loss — втрати потужності радіосигналу при поширенні від передавача до приймача.

Real-time — режим роботи системи, за якого дані надходять і обробляються з мінімальною затримкою, у часі, наближеному до моменту виникнення події.

Wake-on-Interrupt — режим мікроконтролера, при якому пристрій виходить з режиму глибокого сну за апаратним перериванням від сенсора.

ВСТУП

Сучасний етап розвитку глобальної економіки характеризується стрімким зростанням обсягів логістичних перевезень, спричиненим як розширенням міжнародної торгівлі, так і бурхливим розвитком сегменту електронної комерції. У 2024 році глобальний ринок логістики оцінювався у понад 12 трильйонів доларів США, причому темпи його зростання щорічно перевищують середні показники світової економіки [23, 24]. Водночас значна частина галузі залишається технологічно консервативною та функціонує у режимі обмеженої цифрової видимості: одиниця вантажу від моменту відправлення до моменту прибуття залишається пасивним об'єктом, що не здатний самостійно повідомити про своє місцезнаходження або порушення умов перевезення [25].

Найбільш вразливим етапом логістичного процесу є саме транспортування — період, коли вантаж перебуває у дорозі та фізично недоступний для контролю з боку відправника або одержувача. Існуючі засоби моніторингу або забезпечують лише позиціонування транспортного засобу як єдиного об'єкта без спостереження окремих посилок, або вимагають значних капітальних вкладень, що робить їх економічно недоцільними для масового застосування [16-19].

Розв'язання цієї суперечності можливе шляхом розробки модифікованої архітектури IoT-системи, в якій функції розподіляються між двома типами пристроїв: дешевими енергоефективними BLE-тегами на рівні окремих посилок та єдиним інтелектуальним шлюзом транспортного засобу, що бере на себе енерговитратні функції глобального зв'язку та межової обробки даних [26].

Мета дипломної роботи полягає в покращенні якості логістичних перевезень з допомогою технології інтернету речей. Досягнення цієї мети передбачає створення модифікованої архітектури моніторингу, яка дозволяє відстежувати стан окремих посилок у режимі реального часу та при цьому залишається економічно прийнятною для масового впровадження.

Об'єктом дослідження є спостереження у реальному часі за посилками під час перевезення. Сюди належать процеси отримання телеметричних показників від кожної одиниці вантажу, їх передачі через канали зв'язку та подальшої обробки для своєчасного виявлення інцидентів.

Предметом дослідження є система інтернету речей для логістичних перевезень. До неї входять архітектура системи, набір апаратних і програмних модулів, протоколи обміну даними та підходи до забезпечення енергоефективності, масштабованості й захисту інформації.

Методами дослідження є системний аналіз існуючих рішень, структурно-функціональне моделювання архітектури, аналітичне моделювання радіоканалу та енергоспоживання, а також порівняльний аналіз технічних і економічних показників.

За результатами проведених досліджень встановлено, що розроблена модифікована архітектура дозволяє одночасно забезпечити моніторинг стану кожної окремої посилки в режимі реального часу та економічну прийнятність системи для масового застосування. Зокрема, вона забезпечує термін автономної роботи периферійних вузлів до 19,6 місяців без обслуговування, скорочує кількість критичної радіоінфраструктури у 200 разів та зменшує сумарну вартість володіння системою в 11–14 разів порівняно з існуючими ринковими аналогами.

Запропонована у роботі архітектура базується на гібридному підході з ієрархічним розподілом функцій між дешевими BLE-тегами на рівні окремих посилок та єдиним інтелектуальним шлюзом транспортного засобу, що бере на себе енерговитратні функції глобального зв'язку та межової обробки даних. Такий підхід може бути використаний логістичними операторами, перевізниками, операторами складських комплексів та виробниками IoT-обладнання для логістики.

Елементом новизни є розробка модифікованої архітектури IoT-системи моніторингу, яка вперше поєднує гранулярність контролю до окремої посилки, оперативність реагування в режимі реального часу та економічну прийнятність для

масового застосування — властивості, що в існуючих ринкових рішеннях вважаються взаємовиключними.

Практичне значення дослідження обумовлюється стрімким зростанням ринку логістичних послуг та зростаючими вимогами споживачів до прозорості, швидкості та якості доставки в умовах розвитку електронної комерції. Дипломна робота має 75 сторінок тексту, 20 рисунків та 5 таблиць, а також використовує 26 літературних джерел посилання.

РОЗДІЛ 1

АНАЛІЗ ІСНУЮЧИХ ПРОБЛЕМНИХ ПИТАНЬ І ЇХ РІШЕНЬ У СФЕРІ ЛОГІСТИЧНИХ ПЕРЕВЕЗЕНЬ

1.1 Опис системи логістичних перевезень

1.1.1 Структура та рівні логістичної системи

Сучасна логістична система являє собою багатокомпонентну ієрархічну структуру, де кожен рівень виконує специфічні функції для забезпечення безперебійного руху матеріального потоку. Ефективність всієї системи залежить від синхронізації взаємодії між її основними елементами [24, 25]. Узагальнена структура сучасної логістичної системи з чотирьох взаємопов'язаних рівнів наведена на рис. 1.1.

Рисунок 1.1 – Чотирирівнева структура логістичної системи

Макрологістичний рівень

Міжнародні транспортні коридори (МТК) є основою глобальної логістики. Це не просто дороги, а політранспортні системи, що об'єднують різні види сполучення для оптимізації транзиту. Полімодальність коридорів забезпечує швидку перевалку вантажу з морського на залізничний або автомобільний транспорт. Технологічна однорідність забезпечує єдині технічні стандарти на всьому протязі коридору, що мінімізує затримки на кордонах. Пропускна здатність є головною характеристикою коридору — макрологістика прагне до створення «зелених коридорів» з автоматизованим митним оформленням та пріоритетним рухом транзиту.

Глобальні інформаційні вузли на макрорівні — це не сервери, а точки перетину величезних масивів даних від тисяч учасників ринку. Data Hubs та EDI-платформи дозволяють ERP-системам виробника, перевізника та митниці «розмовляти» однією мовою. Супутникові угруповання GPS/Galileo забезпечують глобальну навігацію. Центри хмарних обчислень акумулюють статистику перевезень (Big Data) для прогнозування попиту та оптимізації маршрутів у масштабах континентів.

Ключовими завданнями макрологістичного рівня є синхронізація глобальних ланцюгів постачання, управління ризиками та стійкістю (Resilience) при блокуванні основних вузлів, стандартизація та безпека через єдині протоколи ідентифікації вантажів, а також забезпечення наскрізної видимості (End-to-End Visibility) — створення умов, за яких власник вантажу бачить свій товар на кожному етапі МТК незалежно від кількості залучених підрядників.

Операційний рівень

Операційний рівень логістичної системи відповідає за безпосередню фізичну обробку та переміщення вантажних одиниць. Він є найбільш динамічним сегментом ланцюга постачання, де поєднуються стаціонарні об'єкти інфраструктури та рухомі об'єкти.

Логістичні термінали та крос-докінгові склади виступають вузловими точками, де відбувається зміна напрямку, інтенсивності або структури вантажопотоку. Крос-докінг — процес приймання та відправлення вантажів через склад напряму, без тривалого зберігання. Це критичний етап, де швидкість обробки максимальна, а ризик механічних пошкоджень при інтенсивних розвантажувально-навантажувальних роботах суттєво зростає. Саме тут часто виникає розрив у моніторингу: система бачить, що вантаж «прибув на склад», але не має даних про те, як з ним поводилися під час внутрішньоскладських переміщень.

Рухомий склад (автомобільний транспорт, залізничні платформи, контейнеровози) є мобільним елементом системи, що виконує функцію просторового переміщення вантажу. Сучасний рухомий склад розглядається як активний учасник мережі, обладнується засобами телематики, бортовими комп'ютерами та системами супутникового зв'язку. Усередині фургона або контейнера створюється специфічне середовище, де під час руху вантаж піддається вібраціям, інерційним перевантаженням та температурним коливанням, які не фіксуються стандартними GPS-трекерами автомобіля. У контексті цифровізації рухомий склад перетворюється на рухомий комунікаційний хаб, який має агрегувати дані від усіх IoT-пристроїв, що знаходяться у вантажному відсіку.

Мікрологістичний рівень

Мікрологістичний рівень зосереджений на управлінні та моніторингу конкретних матеріальних одиниць, що складають загальний вантажопотік. Це рівень «первинних даних», де виникає інформація про стан кожної посилки, яка згодом передається ієрархією вгору до глобальних мереж.

Кожна одиниця вантажу піддається індивідуальним ризикам: падінню, ударам при сортуванні або локальному перегріву всередині великої партії. На мікрорівні важливо відстежувати не лише «де» знаходиться вантаж, а й «як» він себе почуває. Проте у традиційних системах одиниця вантажу є пасивним об'єктом — вона не може самостійно повідомити про пошкодження, що створює затримку між моментом аварії та її виявленням.

Упаковка та маркування виконують роль інтерфейсу між фізичним товаром та логістичною системою. Традиційне маркування (штрих-коди, QR-коди) — статичні носії інформації, що забезпечують ідентифікацію лише в моменти сканування персоналом, створюючи «інформаційні розриви» між контрольними точками. Перехід до концепції «розумного пакування» дозволяє трансформувати упаковку з пасивного захисту в активний цифровий пристрій.

Інформаційно-управлінський рівень

Інформаційно-управлінський рівень виконує функцію інтегратора, який поєднує фізичні операції з цифровим середовищем. Сучасна логістика базується на використанні спеціалізованого програмного забезпечення: TMS (Transport Management System) — система керування транспортом; WMS (Warehouse Management System) — система керування складом; ERP (Enterprise Resource Planning) — глобальна система планування ресурсів підприємства. Головною проблемою цих систем є затримка даних (data lag) — вони оновлюються лише після ручного сканування вантажу працівником, що не дозволяє оперативно реагувати на пошкодження в дорозі.

Завданнями цього рівня є створення «цифрового двійника» перевезення, підтримка прийняття рішень з автоматичним оповіщенням менеджерів про відхилення, а також накопичення статистичних даних для аналітики та звітності щодо надійності перевізників, якості упаковки та ефективності маршрутів.

1.2 Аналіз проблемних питань у сфері логістичних перевезень

Незважаючи на загальний прогрес у галузі та активне впровадження сучасних технологій, логістична галузь все ще стикається з низкою системних проблем, які стримують її розвиток та обмежують конкурентоспроможність. Аналіз сучасного стану сектора дозволяє виокремити три ключові групи проблем — низький рівень цифровізації процесів, відсутність належного контролю стану посилок під час перевезення та зростаючі вимоги клієнтів до швидкості і прозорості доставки. Їх узагальнення наведено на рис. 1.2.

Рисунок 1.2 – Ключові проблеми логістичних перевезень

1.2.1 Низький рівень цифровізації процесів

Незважаючи на глобальний тренд на диджиталізацію, значний сегмент логістичного ринку все ще перебуває на етапі фрагментарного впровадження інформаційних технологій. Більшість логістичних компаній використовують програмне забезпечення, яке працює ізольовано — наприклад, WMS не синхронізована в реальному часі з TMS, що призводить до «інформаційних розривів», коли дані про готовність вантажу передаються вручну через телефонні дзвінки або месенджери. Такий підхід збільшує ймовірність помилок та створює затримки в ланцюгу постачання.

Цифровізація зазвичай охоплює лише магістральні етапи перевезення, де встановлені дорогі GPS-трекери, тоді як етап сортування та доставки кінцевому споживачу залишається «сірою зоною». Без використання малогабаритних IoT-пристроїв на рівні кожної посилки оператор не володіє інформацією про те, де саме знаходиться конкретний товар усередині великого контейнера. Значна частина супровідної документації досі оформлюється у паперовому вигляді, що унеможливлює миттєвий аналіз ефективності роботи. Існуючі професійні системи моніторингу мають надлишкову функціональність та високу вартість володіння —

для багатьох компаній закупівля дороговартісного обладнання на кожну одиницю вантажу є економічно недоцільною.

Низький рівень цифровізації призводить до низької прогнозованості логістичних операцій [23, 24]. Відсутність «цифрового двійника» вантажу в реальному часі позбавляє компанію можливості використовувати алгоритми штучного інтелекту та предиктивної аналітики. Подолання цієї проблеми вимагає впровадження модифікованої архітектури Інтернету речей, яка дозволить інтегрувати кожну одиницю вантажу в єдину інформаційну мережу за доступною ціною.

1.2.2 Стан посилок при транспортуванні

Збереження фізичної цілісності та якісних характеристик вантажу є пріоритетним завданням будь-якої логістичної операції. Проте в сучасних ланцюгах постачання стан посилки часто залишається невідомим змінним параметром з моменту виходу зі складу відправника до моменту розпакування кінцевим споживачем.

Під час транспортування вантаж піддається постійним вібраціям, різким гальмуванням або ударам при маневруванні. Окрему проблему становить процес автоматизованого або ручного сортування, де падіння посилки з невеликої висоти може призвести до внутрішніх пошкоджень електроніки або порушення герметичності пакування. Стандартні методи контролю не фіксують ці події, що унеможливлює встановлення точного моменту та причини виникнення дефекту.

Для великої групи товарів (фармацевтичні препарати, продукти харчування, хімічна продукція) критичним є дотримання «холодового ланцюга» [21, 22]. Навіть короткочасне відхилення температури може призвести до повної втрати споживчих властивостей товару. Існуючі пасивні індикатори температури констатують факт порушення лише пост-фактум, не даючи можливості оперативно втрутитися в процес.

Ризик крадіжки або підміни товару залишається актуальним, особливо при транскордонних перевезеннях. Класичні пломби та стікери не сповіщають систему

в реальному часі про факт відкриття коробки. Значна частина пошкоджень виникає через недотримання правил маніпулювання вантажем — без систем безперервного моніторингу, які фіксують орієнтацію посилки в просторі, неможливо контролювати якість роботи персоналу на всіх етапах логістичного циклу.

Технологічний дефіцит полягає в тому, що сучасний логістичний менеджмент базується на припущенні, що вантаж у нормі, поки не доведено протилежне. Це призводить до величезних витрат на страхові виплати, утилізацію пошкодженої продукції та повторні відправлення. Проблема моніторингу стану посилок вимагає впровадження модифікованих IoT-рішень, які здатні не лише фіксувати критичні впливи в момент їх виникнення, а й негайно передавати цю інформацію через шлюзи до центральної системи управління.

1.2.3 Високі вимоги клієнтів до швидкості та прозорості доставки

Сучасний етап розвитку глобальної економіки характеризується стрімким зростанням сегменту електронної комерції, що докорінно змінило парадигму взаємодії між логістичним оператором та кінцевим споживачем. Концепція on-demand economy сформувала новий стандарт очікувань: клієнт більше не розглядає доставку як окрему послугу, а сприймає її як невід'ємну частину якості самого продукту.

Стандарти, задані глобальними лідерами ринку (Same-day & Next-day delivery), змушують локальних перевізників переходити до моделей доставки у день замовлення. Кожна хвилина простою на етапі сортування або очікування паперового оформлення критично впливає на загальний час транзиту. Без автоматизованого обліку кожної посилки досягти такої оперативності неможливо.

Клієнти вимагають точного прогнозування прибуття (Predictive ETA) у часовому вікні 15–30 хвилин. Відсутність реальних даних про місцезнаходження конкретної одиниці товару призводить до похибок у розрахунках часу прибуття. Запит на «інформаційну безперервність» вимагає переходу до наскрізного моніторингу, де клієнт може бачити не просто факт руху, а й умови, в яких перебуває його замовлення. Етап «останньої милі» залишається найменш

керованим — без інтелектуальних засобів ідентифікації та зв'язку між посилкою, кур'єром та отримувачем нівелюється швидкість, досягнута на попередніх магістральних етапах.

Високі вимоги до швидкості та сервісу вимагають переходу до проактивної моделі управління. Впровадження модифікованих IoT-систем дозволить забезпечити клієнта необхідним рівнем прозорості та гарантувати дотримання жорстких часових графіків.

1.3 Аналіз існуючих технічних рішень для контролю стану вантажів

Для вирішення проблеми моніторингу стану посилок під час транспортування на сьогодні використовується декілька основних технологічних підходів. Кожен з них має свої переваги, проте жоден не забезпечує ідеального балансу між вартістю, енергоефективністю та можливістю отримання даних у режимі реального часу на рівні кожної одиниці товару.

1.3.1 Пасивні реєстратори даних (Data Loggers)

Пасивні реєстратори даних, або дата-логери, є найбільш зрілим та поширеним технологічним рішенням для моніторингу умов транспортування. Особливо широке застосування вони знайшли у сфері перевезення продукції, чутливої до температурних коливань (Cold Chain) — медичних препаратів, вакцин, продуктів харчування та високоточної електроніки [21, 22]. Дата-логер — це мікропроцесорний пристрій з одним або кількома сенсорами, Flash-пам'яттю та автономним джерелом живлення. Пристрій працює за принципом періодичного зняття показників із заданою частотою, а доступ до накопиченої інформації здійснюється через USB-порт або NFC. Чотири основні етапи роботи пасивного дата-логера наведено на рис. 1.3.

Рисунок 1.3 – Принцип роботи пасивного дата-логера

Перевагами пасивних реєстраторів є висока метрологічна точність (до ±0,1 °C для температурних логерів), енергетична автономність (від 6 місяців до 3–5 років на одній літієвій батареї), надійність зберігання даних навіть при розряді батареї та відносно низька ціна. Однак головним недоліком є відсутність оперативності — логер працює як «чорна скринька», користувач дізнається про інцидент лише після завершення рейсу. Якщо на початку 10-денного маршруту вийшла з ладу холодильна установка, логер це зафіксує, але диспетчер не зможе втрутитись, і весь вантаж буде утилізовано. Серед інших обмежень — людський фактор (необхідність фізичного зчитування), складність масштабування для великих партій (500+ коробок у фурі) та ризик втрати актуальності даних, що мають цінність лише для аналізу помилок минулого.

1.3.2 Системи GPS-моніторингу транспортних засобів

Системи супутникового моніторингу на базі GPS/ГЛОНАСС є промисловим стандартом для управління автопарком (Fleet Management) [25]. Типова система базується на бортовому терміналі, інтегрованому в електричну мережу транспортного засобу. Пристрій використовує багатоканальні GNSS-приймачі (GPS, Galileo, BeiDou) для точності позиціонування 2,5–5 метрів та підключається до CAN-шини автомобіля для зняття телеметричних даних. Дані передаються на

сервер через стільникові мережі 2G/LTE. Узагальнена архітектура такої системи подана на рис. 1.4.

Рисунок 1.4 – Архітектура GPS-моніторингу транспортного засобу

Перевагами GPS-моніторингу є безперервне енергопостачання від акумулятора автомобіля (моніторинг у реальному часі без обмежень частоти), глобальне покриття завдяки роумінговим SIM-картам та можливості дисциплінарного контролю (відстеження зупинок, відхилень від маршруту). Однак головним недоліком є те, що GPS-трекер контролює автомобіль, а не товар. Металеві стінки фургона або морського контейнера діють як клітка Фарадея, повністю блокуючи супутникові та стільникові сигнали всередині. Диспетчер бачить, що машина стоїть на митниці, але не знає, що всередині контейнера впала палета з коштовним обладнанням. GPS-системи не масштабуються до рівня окремої посилки — встановлення окремого GSM-модуля на кожну коробку технічно неможливе через високу вартість та критичне енергоспоживання GSM-тракту.

1.3.3 RFID-технології

Технологія радіочастотної ідентифікації (RFID) тривалий час розглядалася як головний наступник штрих-кодування. У сучасних логістичних системах RFID

використовується переважно для автоматизації складського обліку та контролю руху вантажів через контрольно-пропускні пункти. Системи RFID розрізняються за типом міток на три основні класи (рис. 1.5): пасивні (без власного живлення, активуються енергією зчитувача, мінімальні габарити та вартість), активні (з власним джерелом енергії, далекодіюча трансляція, підтримка сенсорів) та напівпасивні BAP (з батареєю для сенсорів, але передача через зчитувач) [14].

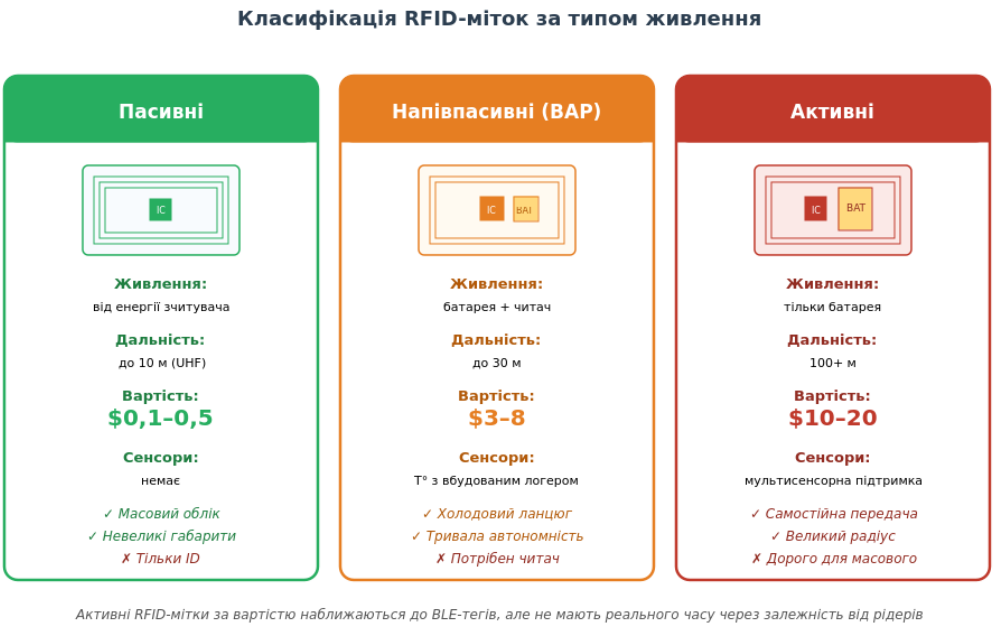


Рисунок 1.5 – Класифікація RFID-міток за типом живлення

Перевагами RFID є групове зчитування сотень об'єктів за секунду без прямої видимості, довговічність та перезаписуваність активних міток, унікальність ідентифікації через серійні номери TID/EPC. Критичними недоліками є обмеженість пасивних рішень (не фіксують стан вантажу поза зоною дії зчитувача), висока вартість інфраструктури (промисловий рідер коштує кілька тисяч доларів), чутливість до металевих поверхонь та рідин у діапазоні UHF, а також економічна недоцільність активних міток ($10–20 за одиницю) для масового маркування.

1.3.4 Спеціалізовані візуальні індикатори (ShockWatch, TiltWatch)

Візуальні індикатори фізичного впливу — клас пасивних механіко-хімічних засобів контролю. Це найпростіший і найдешевший спосіб детектування фактів неналежного поводження з вантажем, проте вони повністю позбавлені

можливостей електронної обробки даних. Індикатори удару (ShockWatch) використовують прецизійну скляну капілярну трубку з рідиною, що забарвлюється при перевищенні порогу прискорення [19]. Індикатори нахилу (TiltWatch) реагують на зміщення кульки або диска при нахилі вантажу понад 80–90 градусів. Принцип роботи обох типів індикаторів проілюстровано на рис. 1.6.

Рисунок 1.6 – Візуальні індикатори фізичного впливу

Перевагами є мінімальна вартість (кілька доларів за одиницю), дисциплінарний ефект на персонал та повна енергонезалежність. Критичним недоліком є повна відсутність цифровізації — дані існують лише у візуальній формі, що унеможливлює автоматичне зчитування та передачу інформації в TMS/WMS. Індикатор констатує лише факт удару, але не фіксує його точний час та місце, що унеможливлює визначення відповідальної сторони. Такі індикатори вразливі до маніпуляцій (підробка, заміна), а суб'єктивність оцінки кольору призводить до суперечок між відправником та отримувачем.

1.3.5 Професійні IoT-рішення

Високотехнологічний сегмент представлений комплексними IoT-платформами від лідерів — Tive, Roambee, Hanhaa, Huawei [16-18]. Ці рішення базуються на інтелектуальних трекерах, що поєднують глобальне позиціонування та набір прецизійних сенсорів для кожної одиниці вантажу. Стандартний набір

включає акселерометр, гігрометр, термістор, датчик освітленості. Для позиціонування використовується гібридна модель GNSS + Cell ID + Wi-Fi WPS. Глобальний зв'язок забезпечується мультирегіональними e-SIM зі стандартами 4G/LTE, NB-IoT та LTE-M. Архітектура такого професійного трекера та проблема його масштабування на парк посилок наведені на рис. 1.7.

Рисунок 1.7 – Архітектура професійного IoT-трекера

Перевагами професійних рішень є наскрізна прозорість (End-to-End Visibility) на рівні товару, попереджувальна аналітика з миттєвими сповіщеннями про вихід параметрів за норму та висока кібербезпека з повним аудитом подій для страхових компаній. Однак критичними недоліками залишаються економічна недоступність (вартість трекера $50–150 плюс щомісячна абонплата за платформу), енергетична дилема (постійне використання GSM/LTE модулів потребує об'ємних акумуляторів), закритість екосистем («Walled Gardens» з прив'язкою до конкретного виробника) та проблема зворотної логістики (дорогі пристрої потребують організації повернення від отримувача до відправника).

1.3.6 Порівняльний аналіз та синтез результатів огляду

Систематизуючи отримані дані про існуючі технології моніторингу, для об'єктивної оцінки було обрано п'ять ключових критеріїв, що мають вирішальне значення для масового логістичного ринку: оперативність (Real-time), деталізація (Granularity), енергонезалежність, економічна доцільність та інтегрованість [10, 13]. Зведену порівняльну характеристику п'яти класів технологій у вигляді радар-діаграми наведено на рис. 1.8.

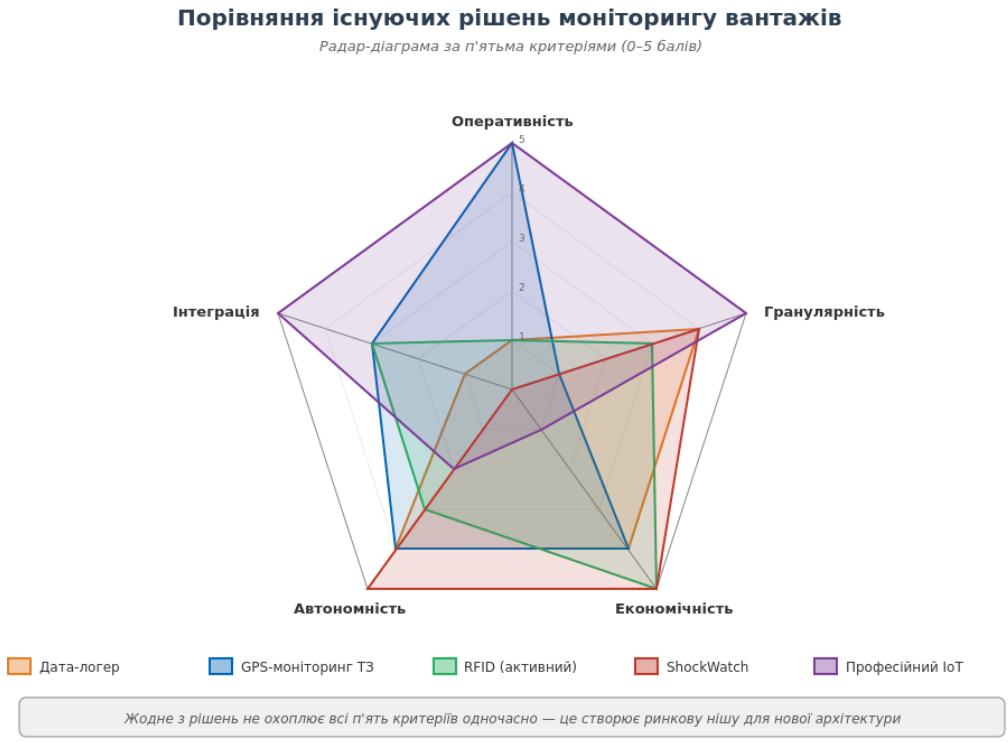


Рисунок 1.8 – Порівняння існуючих рішень моніторингу вантажів

Проведений огляд виявив чітку дилему: рішення, що забезпечують високу точність та реальний час (Enterprise IoT), є економічно недоступними для 90 % логістичних операцій. З іншого боку, доступні рішення (Data Loggers, RFID, ShockWatch) є або «сліпими» під час транзиту, або вимагають значної ручної праці та дорогої стаціонарної інфраструктури. Особливе місце посідає проблема енергетичного балансу — використання енергоємних протоколів GSM/LTE безпосередньо на рівні вантажу є головним бар'єром, який не дозволяє масштабувати професійні системи на рівень кожної коробки.

На основі проведеного аналізу в даній дипломній роботі пропонується гібридна архітектура, що базується на розподілі функцій: низькоенергетичні та

дешеві BLE-мітки забезпечують контроль одиничних вантажів, тоді як єдиний інтелектуальний шлюз на транспортному засобі бере на себе енерговитратну функцію передачі даних у глобальну мережу. Технічне обґрунтування та повний опис запропонованої архітектури викладено у другому розділі дипломної роботи.

Висновки до розділу 1

У першому розділі дипломної роботи виконано всебічний аналіз сучасного стану логістичної галузі, її проблемного поля та технологічних рішень, що використовуються для моніторингу вантажів. Основними результатами є такі:

1. Систематизовано структуру сучасної логістичної системи у вигляді чотирирівневої моделі — макрологістичного, операційного, мікрологістичного та інформаційно-управлінського рівнів. Встановлено, що ключові проблеми моніторингу формуються саме на мікрологістичному рівні (одиниця вантажу як пасивний об'єкт) та операційному рівні (вантажний відсік як мікросередовище з власними фізичними впливами).

2. Виявлено три ключові групи проблем у сучасній логістичній галузі: низький рівень цифровізації процесів (особливо у малому та середньому бізнесі), нестача інструментів для контролю фізичного стану посилок під час перевезення (механічні пошкодження, температурні відхилення, несанкціоноване відкриття), а також зростаючі вимоги кінцевих споживачів до швидкості, прозорості та прогнозованості доставки.

3. Проведено порівняльний аналіз п'яти основних класів існуючих технологічних рішень — пасивних дата-логерів, GPS-моніторингу транспортних засобів, RFID-систем, візуальних індикаторів та професійних IoT-трекерів. Встановлено, що жодне з цих рішень не задовольняє одночасно трьом ключовим вимогам: гранулярності моніторингу до окремої посилки, оперативності в режимі реального часу та економічної прийнятності для масового застосування.

4. Виявлено архітектурну суперечність «вартість — оперативність — енергоефективність», що визначає необхідність розробки модифікованої архітектури. Запропоновано принциповий шлях розв'язання — гібридна модель з

розподілом функцій між дешевими BLE-тегами на рівні окремих посилок та єдиним інтелектуальним шлюзом транспортного засобу, що бере на себе енерговитратні функції глобального зв'язку.

Розгорнута розробка та обґрунтування запропонованої архітектури виконані у другому розділі дипломної роботи.

РОЗДІЛ 2

РОЗРОБКА МОДИФІКОВАНОЇ АРХІТЕКТУРИ ЛОГІСТИЧНОЇ СИСТЕМИ НА БАЗІ IoT-ТЕХНОЛОГІЙ

2.1 Модифікована архітектура

Запропонована архітектура побудована на принципі ієрархічного розподілу функцій. Кожен рівень системи виконує строго визначений набір задач, обраний відповідно до його фізичних можливостей та вартісних обмежень. Така декомпозиція дозволяє оптимізувати кожен компонент окремо без необхідності компромісів між суперечливими вимогами.

2.1.1 Принципи побудови модифікованої архітектури

В основі архітектури лежать чотири принципи, які визначають її технічні характеристики та переваги перед існуючими аналогами [3, 10, 13].

Принцип ієрархічного розподілу функцій. Периферійні вузли (BLE-теги) виконують виключно сенсорні функції та локальне оповіщення про критичні події. Інтелектуальний шлюз бере на себе агрегацію, фільтрацію, геолокацію та глобальну передачу даних. Цей принцип безпосередньо відрізняє модифіковану архітектуру від професійних IoT-трекерів, де кожен пристрій є повнофункціональним — а отже, і дорогим — вузлом мережі.

Принцип децентралізованого збору з централізованою обробкою. Кожен тег незалежно генерує телеметричну інформацію та транслює її в радіоефір без встановлення індивідуальних сесій зв'язку. У модифікованій архітектурі це усуває потребу в синхронізації та маршрутизації на рівні тегу, що значно спрощує його програмне забезпечення та подовжує термін автономної роботи з типових 60–90 днів (як у Tive Solo 5G) до 12–24 місяців.

Принцип адаптивної поведінки. Кожен вузол динамічно змінює режим роботи залежно від стану логістичного процесу. У запропонованій архітектурі це реалізовано через механізм пробудження за апаратним перериванням від

акселерометра — підхід, що дозволяє забезпечити миттєву реакцію на критичні події при мінімальному енергоспоживанні у фоновому режимі.

Принцип межової інтелектуалізації. Частина логіки прийняття рішень виноситься на шлюз транспортного засобу. В модифікованій архітектурі це означає, що шлюз виконує первинну класифікацію подій, відсіювання хибних спрацювань та локальне буферування даних у разі тимчасової втрати зовнішнього зв'язку, що скорочує навантаження на канал WAN у середньому в 20–30 разів порівняно з прямою передачею кожного повідомлення на сервер.

2.1.2 Структурно-функціональна модель

Архітектура модифікованої системи декомпозується на чотири логічні рівні, кожен з яких має своє призначення у спільному інформаційному контурі [3].

Фізичний рівень сприйняття утворений сукупністю BLE-тегів, прикріплених до окремих одиниць вантажу. Принципова відмінність цього рівня в модифікованій архітектурі — мінімізація функціональності тегу до простої «сенсор + однонаправлена трансляція». Жодних обчислень, маршрутизації чи прийому даних на цьому рівні не виконується.

Локальний мережевий рівень забезпечує радіозв'язок ближнього радіусу між тегами та шлюзом. У запропонованій архітектурі для цього обрано Bluetooth Low Energy 5.x у режимі недирективної трансляції (Non-connectable Advertising), що дозволяє шлюзу одночасно приймати дані від необмеженої кількості тегів без встановлення з'єднань.

Транспортний рівень глобальної мережі передає агреговані дані від шлюзу до сервера через стільниковий зв'язок. Принциповою особливістю модифікованої архітектури є те, що цей рівень присутній лише на шлюзі, а не на кожному пристрої — це усуває необхідність у сотнях SIM-карт та індивідуальних M2M-тарифах, які становлять основну статтю експлуатаційних витрат професійних IoT-систем.

Прикладний рівень об'єднує серверні сервіси обробки телеметрії, аналітичні алгоритми та клієнтські інтерфейси. У запропонованому рішенні цей

рівень побудований за відкритою інтеграційною моделлю, що забезпечує підключення до існуючих корпоративних систем замовника (ERP, TMS, WMS).

Узагальнена схема архітектури з відображенням усіх чотирьох рівнів та потоків даних між ними наведена на рис. 2.1.

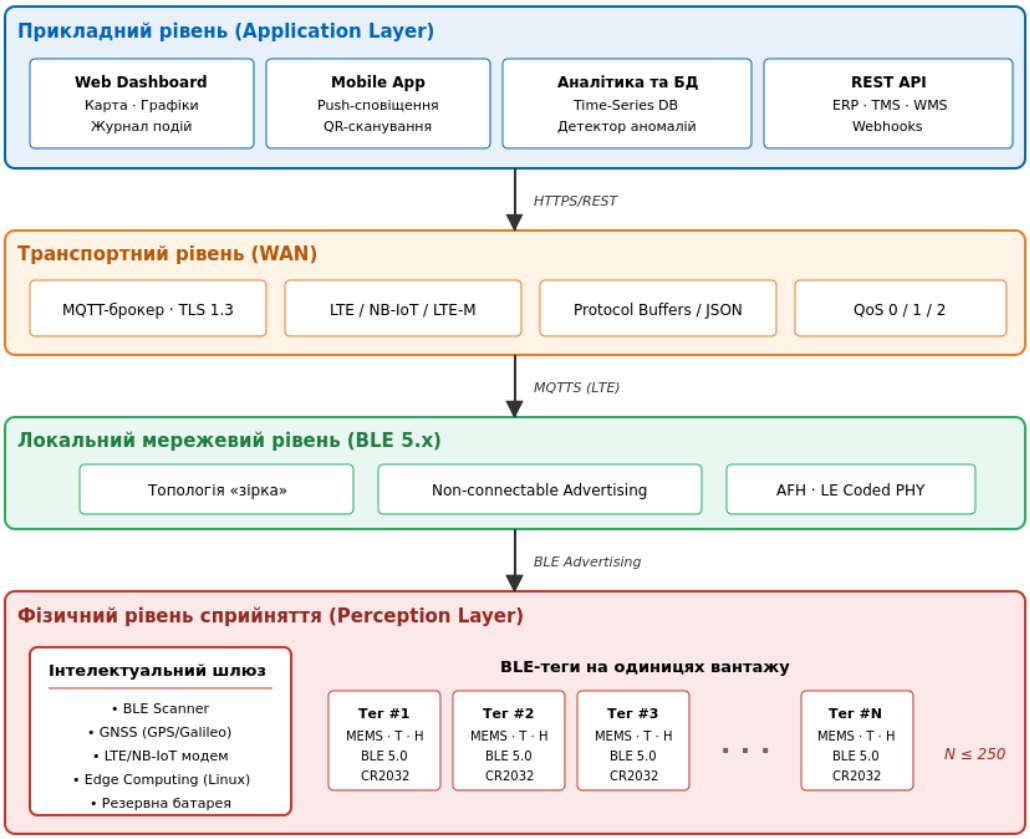


Рисунок 2.1 – Загальна структура модифікованої архітектури логістичної системи

2.1.3 Технічні та функціональні вимоги до системи

Виходячи з виявлених у першому розділі обмежень існуючих рішень, до модифікованої архітектури сформульовано вимоги, узагальнені в таблиці 2.1. На відміну від загальних вимог до IoT-систем, ці вимоги відображають саме той цільовий профіль, який жодне з ринкових рішень не задовольняє у повному обсязі.

Таблиця 2.1 – Цільові вимоги до модифікованої архітектури

Категорія вимог	**Параметр**	**Цільове значення**
Гранулярність	Рівень контролю	Окрема одиниця вантажу

Категорія вимог	Параметр	Цільове значення
Енергонезалежність	Термін автономної роботи тегу	Не менше 12–24 місяців
Економічність	Цільова собівартість тегу	До 5–8 USD
Оперативність	Час реакції на критичну подію	Не більше 30 секунд
Масштабованість	Кількість тегів на один шлюз	До 250 одиниць
Стійкість до завад	Робота в металевому контейнері	Радіус надійного зв'язку ≥ 15 м
Інформаційна безпека	Захист каналу зв'язку	Багаторівневий

2.2 Компоненти модифікованої архітектури

У цьому підрозділі розглянуто склад апаратних та програмних компонентів системи з акцентом на ту функціональну роль, яку кожен з них виконує саме в модифікованій архітектурі. Загальні характеристики стандартних компонентів подані стисло, оскільки основну цінність становить саме обраний підхід до їх застосування.

2.2.1 BLE-тег як спрощений сенсорний вузол

У запропонованій архітектурі BLE-тег виконує принципово обмежений набір функцій — лише первинне сенсорне сприйняття та однонаправлену трансляцію даних. Такий підхід дозволив зменшити кількість компонентів плати до п'яти-шести елементів та довести собівартість тегу до цільового рівня 5–8 USD, що в 10–20 разів нижче за вартість аналогічних професійних трекерів.

Сенсорний блок містить три датчики, кожен з яких призначений для виявлення конкретного класу логістичних інцидентів. Триосьовий MEMS-акселерометр у запропонованій архітектурі виконує не лише вимірювальну, але й керуючу функцію — його вбудований апаратний логічний блок генерує переривання при перевищенні порогу прискорення, що дозволяє мікроконтролеру тегу більшість часу перебувати у глибокому сні [20]. Цифровий датчик температури та вологості забезпечує контроль дотримання умов перевезення для вантажів холодового ланцюга, а фотодіод детектує несанкціоноване відкриття

упаковки. Усі три сенсори обрано з огляду на компромісне поєднання необхідної точності та мінімального енергоспоживання.

Обчислювальне ядро на базі однокристальної системи ARM Cortex-M0+/M4 з інтегрованим радіо BLE 5.x є тим самим компонентом, що використовується в десятках споживчих IoT-пристроїв [2, 20]. Особливістю його застосування в модифікованій архітектурі є мінімальне програмне навантаження — прошивка тегу містить лише цикл «прокинутися → виміряти → передати → заснути», без стека маршрутизації, без алгоритмів самоорганізації мережі, без обробки вхідних повідомлень. Це дозволяє використовувати найдешевші моделі SoC, які достатні для такої задачі.

Підсистема живлення на основі літієвої батареї CR2032 або CR2450 з LDO-стабілізатором характеризується надзвичайно низьким струмом спокою (менше 1 мкА), що в поєднанні з апаратним режимом сну забезпечує цільовий термін автономної роботи 12–24 місяці. Структурна схема тегу з усіма перерахованими блоками та внутрішніми зв'язками між ними наведена на рис. 2.2.

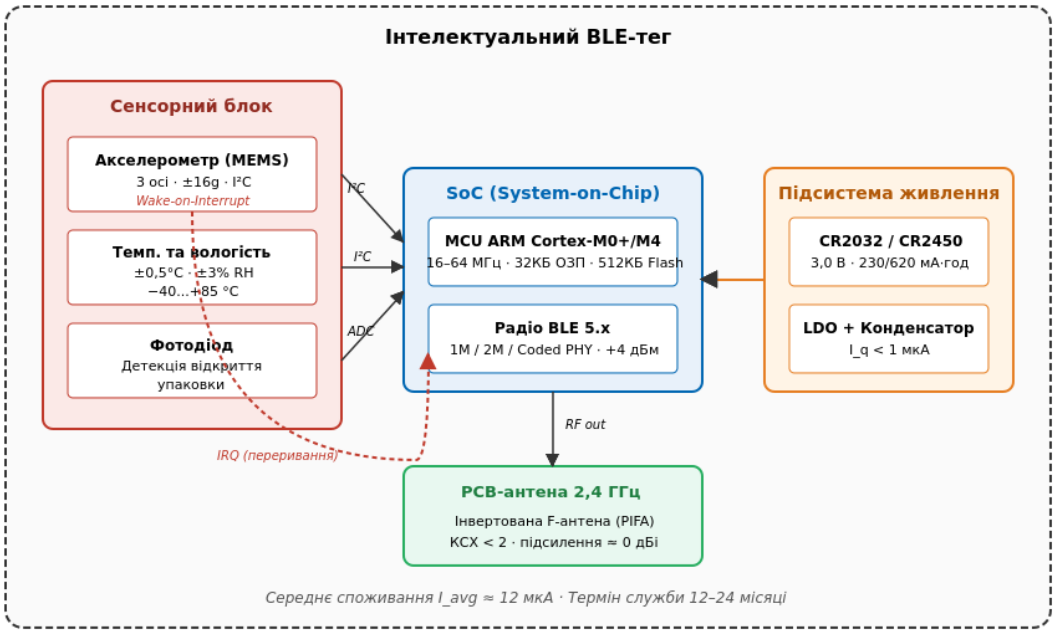


Рисунок 2.2 – Структурно-функціональна схема BLE-тегу в модифікованій архітектурі

2.2.2 Інтелектуальний шлюз як концентратор та межовий обчислювач

Інтелектуальний шлюз є центральним елементом модифікованої архітектури — саме тут зосереджені всі ті функції, що в традиційних рішеннях розподілені по сотнях периферійних трекерів. Шлюз виконує чотири ролі, кожна з яких має чітку причину свого розміщення саме на цьому рівні системи.

Концентратор локальної BLE-мережі. Шлюз постійно сканує радіоефір на трьох рекламних каналах BLE (37, 38, 39), що в модифікованій архітектурі забезпечує максимальну ймовірність прийому повідомлень від тегів з мінімальною затримкою. Підтримка адаптивного частотного керування AFH та режиму LE Coded PHY дозволяє забезпечити стійкий зв'язок у складних радіоумовах металевого вантажного відсіку.

Маршрутизатор стільникового зв'язку. Стільниковий модем шлюзу з підтримкою LTE Cat-M1 та NB-IoT використовується в модифікованій архітектурі як єдина точка глобального зв'язку для всієї мережі тегів [7]. Це дозволяє обходитися однією SIM-картою на весь транспортний засіб замість сотень SIM на кожному окремому трекері — економія, що становить десятки разів у вимірі експлуатаційних витрат на M2M-зв'язок.

Геолокаційний приймач. GNSS-приймач шлюзу з одночасною обробкою сигналів GPS, Galileo та BeiDou забезпечує визначення місцезнаходження не для окремих посилок, а для всього вантажного відсіку як цілого. Це найдешевший спосіб отримати геодані для кожної посилки — кожен тег успадковує координати шлюзу в момент трансляції повідомлення, без необхідності власного GNSS-модуля.

Межовий обчислювач (Edge Computing). Обчислювальне ядро шлюзу з повноцінною операційною системою Embedded Linux [11] дозволяє виконувати безпосередньо на місці фільтрацію хибних спрацювань, агрегацію даних, локальне буферування у разі тимчасової втрати зв'язку та шифрування TLS. У модифікованій архітектурі це знижує навантаження на канал WAN (за рахунок агрегації багатьох повідомлень тегів в одне), забезпечує безперервність моніторингу (за рахунок локального буфера ємністю 100 МБ)

та підвищує безпеку (за рахунок виконання криптографічних операцій до виходу даних у зовнішню мережу).

Шлюз монтується у верхній центральній точці вантажного відсіку, що в модифікованій архітектурі забезпечує оптимальну зону покриття BLE для більшості тегів. Структурна схема шлюзу з усіма перерахованими підсистемами наведена на рис. 2.3.

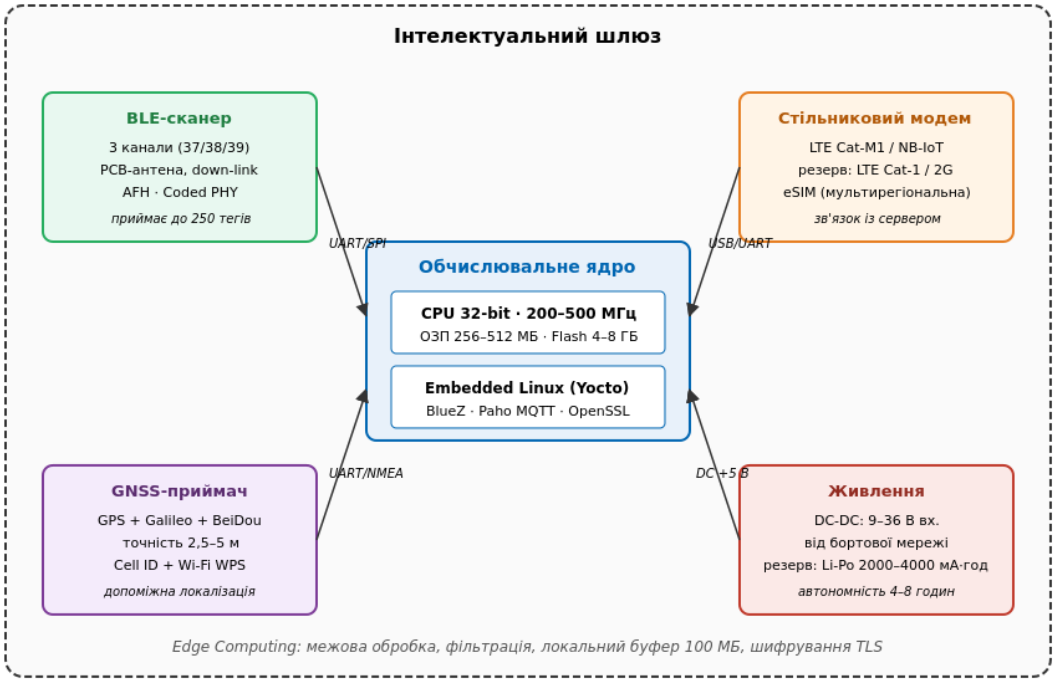


Рисунок 2.3 – Структурно-функціональна схема інтелектуального шлюзу

2.2.3 Серверна інфраструктура та клієнтський рівень

Серверна частина модифікованої архітектури організована за мікросервісною моделлю з можливістю горизонтального масштабування. Хоча сам набір серверних компонентів (брокер повідомлень, база даних часових рядів, аналітичні сервіси) є типовим для промислових IoT-систем, у запропонованому рішенні їх використано з оптимізацією під специфіку гібридного трафіку — рідкі пакетні передачі від великої кількості шлюзів з різних регіонів.

Точкою входу серверної частини є MQTT-брокер. У модифікованій архітектурі його роль полягає не лише у прийомі повідомлень, але й у первинному розподілі їх за пріоритетом — повідомлення з прапором критичної події негайно

маршрутизуються в аналітичний модуль для генерації сповіщень, тоді як планова телеметрія потрапляє у чергу батчевої обробки. Такий підхід дозволяє при значному обсязі трафіку (тисячі повідомлень за хвилину) забезпечувати час реакції на критичні події в межах 30 секунд.

Зберігання даних у запропонованій системі реалізовано двома типами баз даних. База даних часових рядів використовується для зберігання великих обсягів телеметрії з прив'язкою до часових міток, що в модифікованій архітектурі дозволяє ефективно виконувати запити вибірки даних за маршрутом конкретної посилки. Реляційна база даних PostgreSQL зберігає структурну інформацію про вантажі, маршрути, користувачів та інциденти — те, що потрібно для бізнес-логіки системи.

Клієнтський рівень представлений трьома формами доступу — веб-інтерфейс для операторів, мобільний додаток для водіїв та керівників, а також REST API для інтеграції із зовнішніми корпоративними системами. У модифікованій архітектурі особливу увагу приділено саме REST API: він спроектований так, щоб мінімізувати бар'єр інтеграції з існуючими ERP, TMS і WMS-системами замовників, що знімає типову проблему впровадження нових IoT-рішень — необхідність повної перебудови IT-інфраструктури.

2.3 Схема взаємодії компонентів

2.3.1 Обґрунтування топології «зірка»

Вибір топології локальної мережі моніторингу є визначальним рішенням, що впливає на енергоспоживання тегів, складність їхнього програмного забезпечення та надійність роботи системи в цілому. У модифікованій архітектурі обрано топологію «зірка», де всі BLE-теги взаємодіють безпосередньо з єдиним шлюзом без проміжних з'єднань [8, 14].

Альтернативні топології розглядалися та були відхилені з конкретних причин. Комірчаста (mesh) топологія, незважаючи на велику зону покриття, була б надлишковою — кожен ретранслюючий вузол подвоював би своє енергоспоживання, що зруйнувало б цільовий показник автономної роботи 12–24 місяці. Деревовидна топологія потребувала б введення проміжних вузлів-

агрегаторів, що ускладнило б та подорожчало б систему. Натомість «зірка» в умовах обмеженого простору вантажного відсіку дає кілька конкретних переваг:

- Теги в модифікованій архітектурі не виконують функцій маршрутизації, що дозволяє їм 99,9 % часу перебувати в режимі глибокого сну зі споживанням 1–3 мкА.
- Час доставки критичного сигналу від тегу до шлюзу детермінований і складає не більше 100–200 мс — на відміну від mesh-мережі, де затримка непередбачувана через черги на проміжних вузлах.
- Відсутність необхідності в алгоритмах самоорганізації мережі дозволяє використовувати спрощені прошивки тегів з обсягом коду менше 32 КБ, що в свою чергу дозволяє застосовувати найдешевші моделі SoC.

Для подолання проблеми «мертвих зон» та екранування радіосигналу металевими конструкціями вантажного відсіку базова топологія «зірка» в модифікованій архітектурі доповнюється трьома технічними рішеннями. Перше — просторове розміщення шлюзу у верхній центральній точці відсіку, що забезпечує пряму радіовидимість для більшості тегів. Друге — адаптивне використання режиму LE Coded PHY, який збільшує бюджет каналу на 12 дБ за рахунок прямого виправлення помилок, що дозволяє надійно приймати сигнали від тегів навіть у глибині щільно заповненого відсіку. Третє — застосування алгоритму AFH для уникнення каналів, на яких працюють інші пристрої (Wi-Fi, побутова електроніка).

Графічне представлення обраної топології з типовим розміщенням шлюзу та тегів наведено на рис. 2.4.

Рисунок 2.4 – Топологія «зірка» у вантажному відсіку транспортного засобу

2.3.2 Сценарії обміну даними в модифікованій архітектурі

Робота модифікованої системи описується трьома типовими сценаріями взаємодії, кожен з яких має свій профіль за інтенсивністю трафіку та критичністю за часом.

Сценарій планової телеметрії

У базовому режимі кожен тег з інтервалом 60 секунд прокидається, виконує одиничне вимірювання температури, вологості та заряду батареї, формує телеметричний пакет та транслює його на трьох каналах BLE. Шлюз приймає всі такі повідомлення в зоні досяжності та накопичує їх у локальному буфері. З інтервалом 1–5 хвилин буферовані дані агрегуються в одне консолідоване MQTT-повідомлення, що передається на сервер. У модифікованій архітектурі саме цей механізм агрегації забезпечує радикальне скорочення трафіку WAN — до однієї передачі на 50–500 окремих сенсорних подій.

Сценарій реєстрації критичної події

При фіксації акселерометром удару, що перевищує поріг 2 g (для крихких вантажів — 0,5 g), генерується апаратне переривання, яке миттєво виводить мікроконтролер тегу зі сну. Тег зчитує профіль удару (значення прискорення з

частотою 400–800 Гц протягом 100–250 мс), виконує первинну фільтрацію хибних спрацювань та формує пакет події з прапором високого пріоритету. Цей пакет транслюється з підвищеною частотою повторення (10–20 разів протягом 2–3 секунд).

У модифікованій архітектурі такий пакет обробляється шлюзом за окремим швидким маршрутом — він обходить чергу агрегації та негайно публікується на сервері з рівнем якості MQTT QoS 1. На сервері подія обробляється потоковим аналізатором, формується сповіщення для відповідних користувачів та запис додається до журналу інцидентів. Загальний час від фізичного удару до сповіщення кінцевого користувача не перевищує 30 секунд. Діаграма послідовності цього сценарію наведена на рис. 2.5.

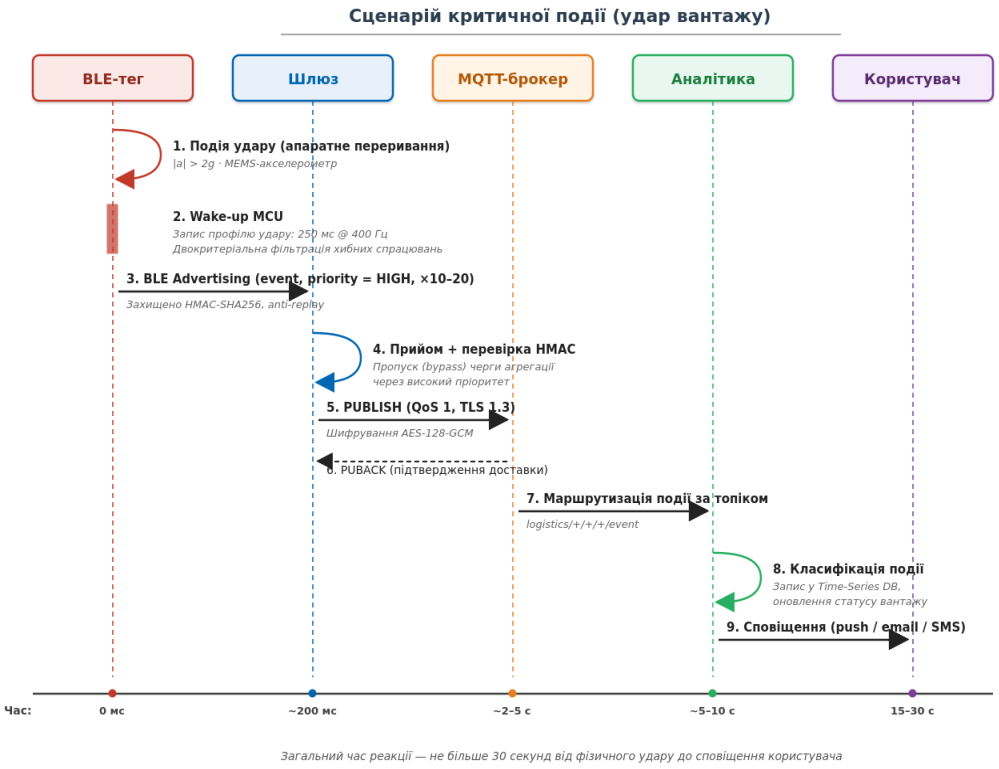


Рисунок 2.5 – Діаграма послідовності обробки критичної події

Сценарій роботи при відсутності зовнішнього зв'язку

Принциповою особливістю модифікованої архітектури є здатність до продовження функціонування навіть при тимчасовій втраті зв'язку шлюзу з сервером (проїзд тунелю, зона без покриття стільникового зв'язку). Шлюз

продовжує приймати дані від тегів і зберігає їх у внутрішньому кільцевому буфері (на основі флеш-пам'яті ємністю до 100 МБ). При відновленні зовнішнього зв'язку шлюз ініціює процедуру синхронізації, передаючи накопичені дані пакетами в хронологічному порядку. Завдяки використанню часових міток, сформованих у момент початкового прийому подій шлюзом, сервер відновлює часовий ряд телеметрії точно, без втрати інформації про реальний час інцидентів.

2.4 Математичне та алгоритмічне забезпечення модифікованої архітектури

2.4.1 Математична модель розповсюдження радіосигналу

Стабільність радіоканалу «тег → шлюз» у вантажному відсіку транспортного засобу є визначальною характеристикою працездатності модифікованої архітектури. Металеві стінки кузова утворюють екрануюче середовище з вираженим багатопроменевим поширенням радіохвиль, що зумовлює специфічну поведінку сигналу та потребує адаптивного вибору режиму BLE-передачі (1M PHY, 2M PHY або LE Coded PHY) залежно від поточних радіоумов.

Для оцінки втрат сигналу між тегом та шлюзом у модифікованій архітектурі використовується логарифмічно-нормальна модель втрат на трасі (Log-Distance Path Loss Model) [9]:

$$L(d) = L_0 + 10 \cdot n \cdot \lg(d/d_0) + X\sigma \qquad (2.1)$$

де $L(d)$ — загальні втрати сигналу на відстані d, дБ;

L_0 — еталонні втрати на референсній відстані $d_0 = 1$ м, дБ;

n — показник затухання середовища (path loss exponent);

$X\sigma$ — випадковий компонент затінення (shadow fading), що описується гаусовим розподілом з нульовим середнім та середньоквадратичним відхиленням σ, дБ.

Максимально допустима відстань стійкого зв'язку для обраного режиму PHY визначається бюджетом каналу:

$$d\_max = d_0 \cdot 10^{((L\_max - L_0 - 3\sigma) / (10 \cdot n))} \qquad (2.2)$$

де L_max — максимально допустимі втрати у тракті (бюджет каналу мінус запас на завмирання).

Параметри n та σ суттєво залежать від середовища: для вільного простору $n = 2$ і σ близьке до нуля, тоді як для металевого вантажного відсіку, заповненого різнорідними матеріалами, n зростає до 3,5–4,0, а σ — до 6–8 дБ. Саме ці значення є визначальними для проектування топології мережі в модифікованій архітектурі: вони обґрунтовують необхідність центрального розміщення шлюзу та доцільність застосування LE Coded PHY у складних умовах.

2.4.2 Модель інформаційного навантаження

Принцип ієрархічного розподілу функцій у модифікованій архітектурі передбачає різний характер трафіку на локальному та глобальному рівнях зв'язку [15]. Локальний канал (BLE) обслуговує велику кількість незалежних трансляцій від тегів, тоді як глобальний канал (WAN) передає консолідовані агреговані повідомлення від шлюзу до сервера. Розрахунок навантаження на ці канали виконується за різними формулами.

Сумарний потік даних від тегів до шлюзу у локальній мережі BLE обчислюється з урахуванням кількості активних вузлів, розміру пакета та інтервалу планової передачі:

$$D\_local = N \cdot (L\_pkt + L\_adv) \cdot 8 \cdot k\_event / T\_p \quad (2.3)$$

де N — кількість активних тегів у мережі;

L_pkt — корисне навантаження BLE-пакета, байт;

L_adv — службові заголовки рекламного пакета, байт;

T_p — інтервал планової передачі, с;

k_event — поправковий коефіцієнт, що враховує додатковий подійний трафік.

Вихідний трафік шлюзу до сервера залежить від розміру агрегованого MQTT-пакета, що формується з даних групи тегів:

$$L\_mqtt(k) = L\_header + k \cdot (L\_id + L\_data) \quad (2.4)$$

де L_header — сумарні заголовки TCP/IP, TLS та MQTT, байт;

L_id — ідентифікатор пристрою, байт;

L_data — корисні дані сенсорів у обраному форматі серіалізації, байт;

k — кількість тегів, дані яких агрегуються в одному пакеті.

Така модель агрегації, реалізована у модифікованій архітектурі, є ключовим механізмом скорочення вартості зв'язку: один MQTT-пакет може містити дані десятків тегів, що замінює десятки окремих передач у професійних трекерах. Конкретні значення трафіку та порівняння з ринковими аналогами наведено у підрозділі 3.1 дипломної роботи.

2.4.3 Енергетична модель тегу

Цільовий показник автономної роботи тегу (12–24 місяці без обслуговування) забезпечується завдяки тому, що в модифікованій архітектурі тег більшість часу перебуває у режимі глибокого сну [12]. Середній струм споживання обчислюється як зважена сума струмів у різних режимах роботи протягом повного циклу:

$$I_{avg} = (I_{sleep} \cdot t_{sleep} + I_{meas} \cdot t_{meas} + I_{tx} \cdot t_{tx}) / T_p \qquad (2.5)$$

де I_{sleep} — струм у режимі глибокого сну, мкА;

I_{meas} — струм у режимі вимірювання сенсорів, мкА;

I_{tx} — струм у режимі радіопередачі, мкА;

t_{sleep}, t_{meas}, t_{tx} — тривалості відповідних фаз протягом одного циклу, с;

T_p — повний період циклу, с.

Термін служби батареї тегу обчислюється з урахуванням її номінальної ємності та коефіцієнта корисного використання:

$$T_{life} = C \cdot k_{use} / I_{avg} \qquad (2.6)$$

де C — номінальна ємність батареї, мА·год;

k_{use} — коефіцієнт корисного використання, що враховує саморозряд та температурну деградацію.

Принципова перевага модифікованої архітектури полягає в тому, що завдяки відсутності енерговитратного стільникового модема у складі тегу (на відміну від професійних трекерів), значення I_{avg} вдається утримати на рівні одиниць мікроамперів. Конкретні чисельні значення для типових параметрів і порівняння з конкурентними рішеннями надано у підрозділі 3.1.3.

2.4.4 Двокритеріальний алгоритм детекції удару

Однією з найскладніших задач при моніторингу стану вантажу є відрізнення справжнього удару від фонових вібрацій, періодичних поштовхів від двигуна та дорожнього покриття. Традиційні однопорогові алгоритми, що використовуються в більшості пасивних індикаторів типу ShockWatch, дають високий відсоток хибних спрацювань — до 30–40 % за галузевою статистикою.

У модифікованій архітектурі застосовано двокритеріальний алгоритм, який оцінює подію за двома незалежними характеристиками — піковим значенням модуля прискорення та інтегральним показником удару у часовому вікні. Тільки за виконання обох умов одночасно подія класифікується як справжній удар та формується пакет повідомлення. Такий підхід дозволяє відсіювати періодичні вібрації (які мають високі піки, але низький інтегральний показник через короткочасний характер) та повільні нахили (низькі піки, але високий інтеграл) — без помилкового пропуску реальних інцидентів.

Логіка роботи алгоритму у вигляді блок-схеми наведена на рис. 2.6. Алгоритм складається з двох послідовних рівнів перевірки: первинна детекція за пороговим значенням THR_1 (1,5 g) запускає детальне дослідження, а вторинна двокритеріальна перевірка за порогом THR_2 (2,5 g) та мінімальним інтегральним показником S_min приймає остаточне рішення про класифікацію події.

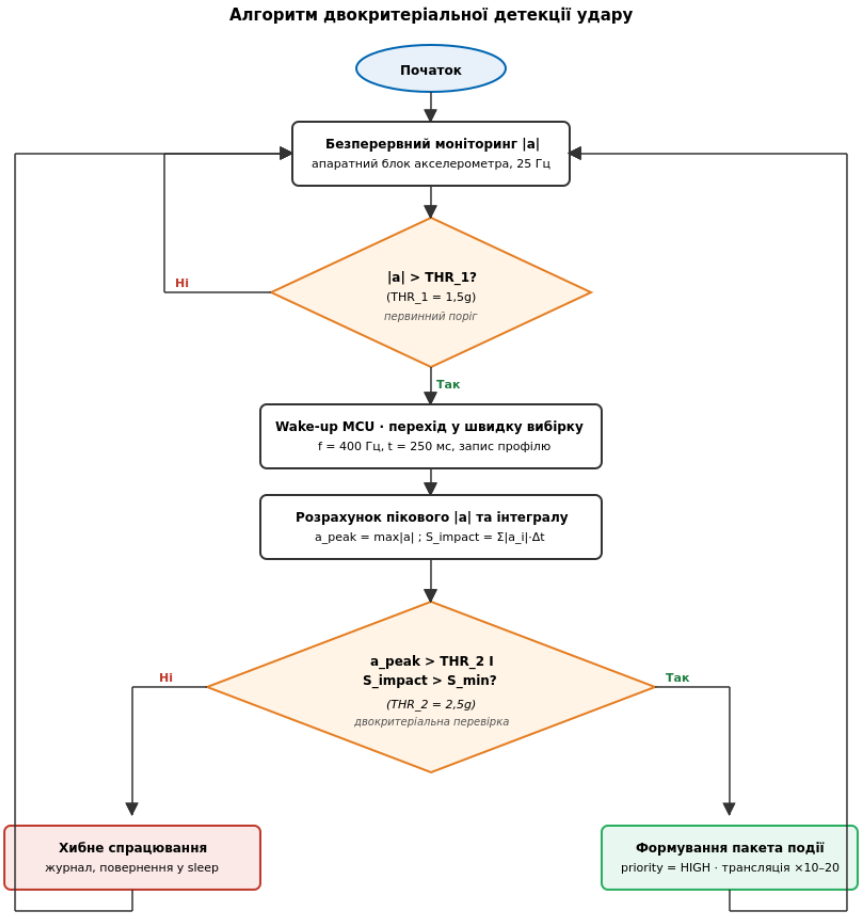


Рисунок 2.6 – Блок-схема алгоритму двокритеріальної детекції удару

2.4.5 Адаптивне керування частотою опитування

Для досягнення цільового терміну автономної роботи тегу 12–24 місяці у модифікованій архітектурі впроваджено алгоритм адаптивного перемикання між трьома профілями активності залежно від стану логістичного процесу.

Профіль «Зберігання» (Storage) активується при тривалій відсутності змін прискорення понад 30 хвилин — це інтерпретується як перебування вантажу на складі. Період опитування збільшується до 600 секунд, активною залишається лише температура. Профіль «Транзит» (Transit) — базовий під час руху транспортного засобу: період 60 секунд, усі сенсори активні. Профіль «Інцидент» (Alert) активується на 10 хвилин після критичної події: період опитування скорочується до 5 секунд для отримання детальної картини розвитку ситуації.

Кожен з трьох профілів оптимізований під свій сценарій: «Зберігання» мінімізує енерговитрати, коли подій не очікується; «Транзит» забезпечує достатню частоту даних для нормального моніторингу; «Інцидент» — детальну фіксацію розвитку аварійної ситуації для подальшого аналізу.

2.4.6 Алгоритм виявлення аномалій на серверному рівні

На прикладному рівні модифікованої архітектури реалізовано алгоритм потокового виявлення аномалій, що порівнює поточні значення параметрів з еталонними профілями для конкретного типу вантажу. На відміну від простих абсолютних порогів, які використовуються в традиційних системах і дають багато хибних спрацювань через індивідуальні особливості різних вантажів, у запропонованому рішенні використовується комбінований підхід.

Алгоритм одночасно перевіряє два критерії — абсолютне порушення (значення виходить за дозволений інтервал [X_min, X_max] для даного типу вантажу) та статистичне відхилення (стандартизоване відхилення від ковзного середнього перевищує поріг z_thr = 3 протягом m_thr послідовних вимірювань). Поєднання обох критеріїв дозволяє виявляти як грубі порушення (наприклад, різке зростання температури при відкритті холодильника), так і повільні дрейфи

(поступове порушення холодового ланцюга при деградації ізоляції), що типова однопорогова логіка пропускає.

2.5 Протокол обміну та інформаційна безпека

У цьому підрозділі представлено протокольні та безпекові рішення, реалізовані в модифікованій архітектурі. Акцент зроблено саме на тих відмінностях, які обумовлені специфікою запропонованого підходу — гібридним стеком зв'язку та необхідністю мінімізувати обчислювальне навантаження на дешеві периферійні вузли.

2.5.1 Структура BLE-пакету в модифікованій архітектурі

На рівні зв'язку «тег → шлюз» використовується недирективний режим рекламних трансляцій BLE [2], обраний з огляду на специфіку модифікованої архітектури: відсутність необхідності встановлення з'єднання (що економить енергію тегу) та можливість одночасного прийому шлюзом повідомлень від необмеженої кількості тегів.

Стандартний BLE Advertising пакет надає лише 31 байт корисного навантаження, тому в запропонованому рішенні розроблено спеціальну компактну структуру даних, де всі поля упаковані за бітовими межами. Деталізація 26-байтового корисного навантаження наведена в таблиці 2.2 та на рис. 2.7.

Таблиця 2.2 – Структура корисного навантаження BLE-пакета модифікованої архітектури

Поле	**Розмір**	**Призначення в архітектурі**
Manufacturer ID	2 Б	Ідентифікатор виробника системи
Packet Type	1 Б	Тип пакета: телеметрія, удар, відкриття, низька батарея
Sequence Number	2 Б	Захист від атак повторного відтворення
Timestamp	4 Б	Час події у форматі UNIX-time
Sensor data	11 Б	Температура, вологість, прискорення XYZ, освітленість

Поле	Розмір	Призначення в архітектурі
Battery Voltage	1 Б	Напруга батареї
Flags	1 Б	Прапори стану (пріоритет, стан сенсорів)
HMAC	4 Б	Скорочена аутентифікаційна сума (HMAC-SHA256[0:4])

2.5.2 Гарантована доставка повідомлень шлюз — сервер

На рівні «шлюз → сервер» у модифікованій архітектурі використовується протокол MQTT [4] з диференційованим застосуванням рівнів якості обслуговування (QoS) для різних типів повідомлень. Цей підхід оптимізує співвідношення між надійністю доставки та накладними витратами на мобільний трафік.

Для регулярної телеметрії, де втрата окремого повідомлення некритична через високу частоту наступних, застосовується QoS 0 (без підтвердження) — це мінімізує службовий трафік. Для подійних повідомлень про інциденти застосовується QoS 1 з гарантією доставки принаймні один раз — це забезпечує оперативне реагування. Для конфігураційних команд від сервера до шлюзу застосовується QoS 2 з гарантією доставки рівно один раз — це запобігає подвоєнню керуючих впливів.

Для агрегованих повідомлень шлюз в модифікованій архітектурі підтримує два формати серіалізації — JSON (для зчитуваності та налагодження) і Protocol Buffers (для компактності трафіку приблизно вдвічі). Перемикання форматів виконується автоматично залежно від тарифного плану M2M-зв'язку, що дозволяє оптимізувати експлуатаційні витрати на стільниковий зв'язок.

2.5.3 Трирівнева модель інформаційної безпеки

Інформаційна безпека модифікованої архітектури реалізована на трьох рівнях, кожен з яких має своє призначення відповідно до особливостей середовища передачі даних на цьому рівні.

Рівень BLE (тег → шлюз). Оскільки радіоканал BLE у режимі рекламних трансляцій принципово відкритий, шифрування на рівні фізичних пакетів

неможливе. У модифікованій архітектурі для цього рівня обрано механізм аутентифікації пакетів за допомогою HMAC-SHA256 [6] зі скороченим тегом 4 байти. До корисного навантаження кожного пакета додається код автентифікації, обчислений на основі попередньо розподіленого ключа PSK із включенням timestamp і sequence number. Це забезпечує захист від атак повторного відтворення (replay attacks) при мінімальному навантаженні на дешеву криптографічну реалізацію тегу.

Рівень WAN (шлюз → сервер). На цьому рівні застосовується стандартний TLS 1.2/1.3 [5] з симетричним шифруванням AES-128-GCM і взаємною автентифікацією mTLS на основі X.509-сертифікатів. У модифікованій архітектурі сертифікати шлюзу зберігаються у захищеній області пам'яті (Secure Element), що унеможливлює підміну шлюзу зловмисником навіть при фізичному доступі до пристрою.

Прикладний рівень. На рівні застосування реалізовано рольовий контроль доступу (RBAC) з тимчасовими JWT-токенами та повний аудит дій користувачів. У модифікованій архітектурі це доповнюється механізмом OTA-оновлення прошивки шлюзу з криптографічним підписом образів та можливістю автоматичного відкату при невдалому встановленні.

Узагальнена графічна модель структури пакета та трирівневої моделі безпеки наведена на рис. 2.7.

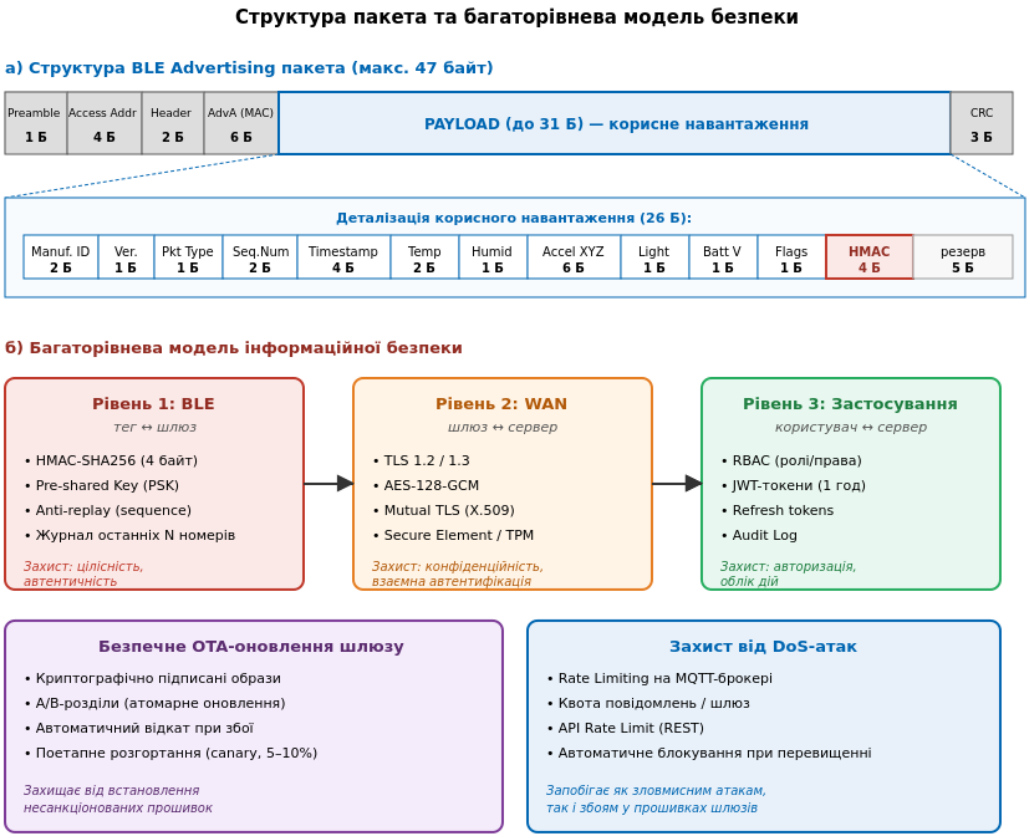


Рисунок 2.7 – Структура BLE-пакета та трирівнева модель інформаційної безпеки

Висновки до розділу 2

У другому розділі дипломної роботи розроблено модифіковану архітектуру логістичної системи моніторингу стану вантажів на базі IoT-технологій. Основними результатами проведеної розробки є такі:

1. Сформульовано принципи побудови модифікованої архітектури — ієрархічний розподіл функцій, децентралізований збір з централізованою обробкою, адаптивна поведінка вузлів та межова інтелектуалізація. Ці принципи безпосередньо відрізняють запропоноване рішення від існуючих професійних трекерів (де кожна посилка несе повний набір комунікаційних компонентів) та від пасивних рішень (де моніторинг у реальному часі взагалі відсутній).

2. Розроблено чотирирівневу структурно-функціональну модель з чітко визначеною роллю кожного компонента: BLE-тег як спрощений сенсорний вузол, шлюз як концентратор та межовий обчислювач, серверна інфраструктура з

мікросервісною архітектурою, клієнтський рівень з відкритими інтерфейсами інтеграції.

3. Обґрунтовано вибір топології «зірка» з конкретними технічними рішеннями для забезпечення стійкості до завад у металевому вантажному відсіку: просторове розміщення шлюзу, адаптивне використання LE Coded PHY та механізм AFH.

4. Побудовано математичні моделі, що визначають характеристики модифікованої архітектури: модель розповсюдження радіосигналу у вантажному відсіку (формули 2.1, 2.2), модель інформаційного навантаження локальної BLE-мережі та глобального WAN-каналу (формули 2.3, 2.4), енергетична модель тегу для оцінки терміну автономної роботи (формули 2.5, 2.6). Ці моделі є інструментом обґрунтування основних експлуатаційних параметрів системи та використовуються у третьому розділі для кількісного порівняння з існуючими рішеннями.

5. Розроблено алгоритмічне забезпечення, специфічне для модифікованої архітектури: двокритеріальний алгоритм детекції удару (з суттєвим зниженням хибних спрацювань порівняно з однопороговою логікою пасивних рішень), адаптивне керування частотою опитування з трьома профілями активності та комбінований алгоритм виявлення аномалій на сервері.

6. Спроектовано протокол обміну на всіх рівнях: компактний 26-байтовий BLE-пакет (84 % корисного навантаження), MQTT з диференційованим QoS залежно від критичності повідомлення, гнучка двоформатна серіалізація (JSON / Protocol Buffers) для оптимізації трафіку.

7. Реалізовано трирівневу модель інформаційної безпеки, адаптовану під особливості гібридного стеку зв'язку: HMAC-SHA256 на BLE з захистом від атак повторного відтворення, TLS 1.2/1.3 з mTLS на WAN, RBAC з JWT на застосуванні.

Кількісне обґрунтування ефективності запропонованої архітектури та її порівняння з існуючими рішеннями за технічними і економічними показниками виконано у третьому розділі дипломної роботи.

РОЗДІЛ 3

ПОРІВНЯЛЬНИЙ АНАЛІЗ ТА ОБҐРУНТУВАННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ЗАПРОПОНОВАНОГО РІШЕННЯ

3.1 Технічна життєздатність запропонованого рішення

Цей підрозділ підтверджує реалізованість трьох найважливіших технічних характеристик архітектури — надійного радіопокриття у складних умовах металевого вантажного відсіку, низького енергоспоживання периферійних вузлів та оперативного реагування на критичні події. Для обґрунтування використано аналітичні розрахунки за двома ключовими інженерними моделями (Path Loss та енергетична модель), решта параметрів представлені у вигляді візуальних порівнянь з ринковими аналогами.

3.1.1 Надійність радіопокриття у вантажному відсіку

Найбільш критичним технічним викликом запропонованої архітектури є забезпечення стійкого радіозв'язку між тегами та шлюзом всередині металевого вантажного відсіку. Це середовище характеризується вираженим багатопроменевим поширенням радіохвиль та глибокими завмираннями сигналу в окремих точках простору. Для оцінки надійного радіуса зв'язку використовується логарифмічно-нормальна модель втрат на трасі [9]:

$$L(d) = L_0 + 10 \cdot n \cdot \lg(d/d_0) + X\sigma \qquad (3.1)$$

де $L(d)$ — загальні втрати сигналу на відстані d, дБ;

L_0 — еталонні втрати на референсній відстані $d_0 = 1$ м (для частоти 2,4 ГГц $L_0 \approx 40$ дБ);

n — показник затухання середовища (для металевого відсіку $n = 3{,}5–4{,}0$);

$X\sigma$ — випадковий компонент затінення ($\sigma = 6–8$ дБ).

Розрахунок за моделлю з урахуванням бюджету каналу BLE 5.0 (95 дБ для 1M PHY та 107 дБ для Coded PHY) дає максимальну відстань стійкого зв'язку 5,2 м у режимі 1M PHY та 10,3 м у режимі Coded PHY. Графічне відображення зон

покриття для стандартного напівпричепа (13,6 × 2,4 м) при центральному розміщенні шлюзу наведено на рис. 3.1.

Рисунок 3.1 – Зона покриття BLE-зв'язку у вантажному відсіку

Як видно з рисунка, при адаптивному перемиканні між режимами 1M PHY (для близько розташованих тегів) та Coded PHY (для дальніх та екранованих) система забезпечує надійне покриття 100 % площі стандартного напівпричепа з ймовірністю успішного приймання понад 99 % для всіх тегів. Це принципово відрізняється від ситуації з професійними IoT-трекерами Tive, де кожен пристрій має власний LTE-модуль і взагалі не потребує локального зв'язку, але саме це й робить їх дорогими.

3.1.2 Енергоефективність та автономність

Розрахунок терміну автономної роботи тегу є визначальним показником, що зумовлює експлуатаційну придатність архітектури для масового застосування [12]. Середній струм споживання тегу обчислюється як зважена сума струмів у різних режимах роботи протягом повного циклу:

$$I_{avg} = (I_{sleep} \cdot t_{sleep} + I_{meas} \cdot t_{meas} + I_{tx} \cdot t_{tx}) / T_p \qquad (3.2)$$

де I_{sleep} — струм у режимі глибокого сну (1,5 мкА);

I_meas — струм у режимі вимірювання сенсорів (1500 мкА);

I_tx — струм у режимі радіопередачі (8000 мкА);

t_sleep, t_meas, t_tx — тривалості відповідних фаз протягом одного циклу;

T_p — повний період циклу (60 с).

Підстановка значень дає середній струм споживання I_avg ≈ 12,2 мкА, що при ємності батареї CR2032 (230 мА·год) із коефіцієнтом корисного використання 0,75 забезпечує термін автономної роботи 19,6 місяців. На рис. 3.2 наведено порівняння енергоспоживання та автономності запропонованого рішення з основними ринковими аналогами у логарифмічній шкалі.

Рисунок 3.2 – Профіль енергоспоживання та автономність порівнюваних рішень

Порівняння наочно демонструє, що запропоноване рішення споживає приблизно у 400 разів менше енергії за Tive Solo 5G (12,2 мкА проти 5 мА), що забезпечує 19,6 місяців автономної роботи на стандартній батареї CR2032 — у 6–10 разів довше за професійні аналоги, які потребують зарядки після кожного рейсу. Це усуває цілий пласт операційних витрат на зарядну інфраструктуру та обслуговуючий персонал.

3.1.3 Оперативність реагування на критичні події

Однією з ключових технічних характеристик системи моніторингу є час від моменту критичної події (удару, перегріву, відкриття упаковки) до отримання сповіщення кінцевим користувачем. Цей параметр визначає здатність системи забезпечувати оперативне реагування на інциденти — основну перевагу IoT-моніторингу над пасивними рішеннями. Порівняння оперативності розглянутих рішень наведено на рис. 3.3.

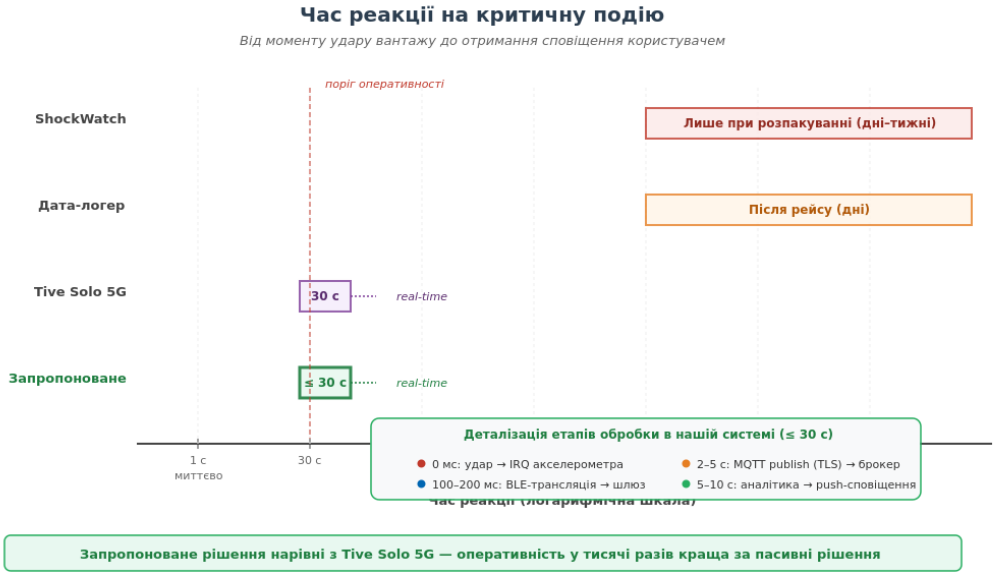


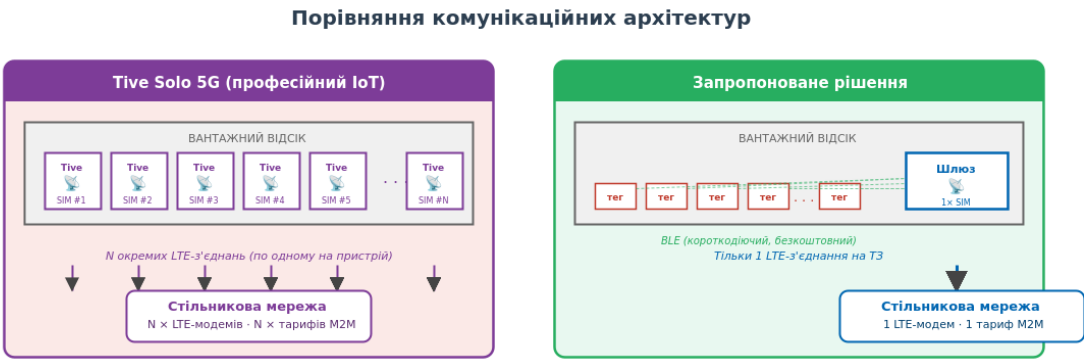
Рисунок 3.3 – Час реакції на критичну подію для різних типів рішень

Як видно з рисунка, пасивні рішення (ShockWatch, дата-логери) забезпечують реакцію лише після фізичного розпакування вантажу — від кількох днів до тижнів. Натомість запропоноване рішення нарівні з Tive Solo 5G забезпечує реакцію за ≤ 30 секунд, що в тисячі разів швидше. Це досягається за рахунок чіткого розподілу етапів обробки: апаратне переривання акселерометра (0 мс) → BLE-трансляція до шлюзу (100–200 мс) → MQTT publish через TLS до брокера (2–5 с) → класифікація події та push-сповіщення користувачу (5–10 с).

3.1.4 Масштабованість та комунікаційна архітектура

Принциповою архітектурною перевагою запропонованого рішення є концентрація енерговитратних і дорогих компонентів (LTE-модема, GNSS-приймача, обчислювального ядра) на єдиному шлюзі замість їх дублювання у кожному пристрої [10, 13]. Це створює дворівневу комунікаційну архітектуру з

двома незалежними каналами зв'язку: локальним BLE-каналом (тег → шлюз) та глобальним стільниковим каналом (шлюз → сервер). Порівняння традиційного підходу (де кожна посилка має власний LTE-модуль) з запропонованим (єдиний шлюз на ТЗ) наведено на рис. 3.4.



Кількісне порівняння при N = 200 посилок на ТЗ

Параметр	Tive Solo 5G	Запропоноване
Кількість LTE/NB-IoT модемів	200	1
Кількість SIM-карт	200	1
Сумарний M2M-трафік, ГБ/міс	12,5–25	0,72
Енергоспоживання радіо у тегу	Високе (LTE)	Низьке (BLE)
Скорочення радіоінфраструктури	*базова лінія*	у 200 разів

Рисунок 3.4 – Порівняння комунікаційних архітектур: Tive Solo 5G та запропоноване рішення

Як видно з порівняльної таблиці на рис. 3.4, запропонована архітектура скорочує кількість критичної радіоінфраструктури у 200 разів при N = 200 посилок на ТЗ: один LTE-модем замість 200, одна SIM-карта замість 200, сумарний M2M-трафік 0,72 ГБ/міс замість 12,5–25 ГБ/міс. Саме це дозволяє масштабувати моніторинг до рівня окремої посилки без пропорційного зростання витрат.

3.2 Технічне порівняння функціональних характеристик

Технічне порівняння запропонованого рішення з ринковими аналогами виконано за десятьма ключовими параметрами, що мають практичне значення для кінцевого користувача. Узагальнені результати представлені у таблиці 3.1.

Таблиця 3.1 – Технічне порівняння запропонованого рішення з ринковими аналогами

Параметр	Tive Solo 5G	ShockWatch	GPS-моніторинг ТЗ	Запропоноване рішення
Гранулярність	Посилка	Посилка	Транспортний засіб	Посилка
Оперативність даних	Real-time	Постфактум	Real-time	Real-time (≤ 30 с)
Тип сенсорів	MEMS, T, RH, світло, поз.	Лише удар або T	Лише GPS	MEMS, T, RH, світло
Точність вимірювання T	± 0,3 °C	± 0,5 °C	—	± 0,5 °C
Термін автономної роботи	60–90 діб (Li-ion, зарядка)	До 100 діб (одноразово)	Від бортової мережі ТЗ	**19,6 міс (CR2032) / 4,4 р. (CR2450)**
Кількість одиниць у мережі	Без обмежень	Без обмежень	1 пристрій на ТЗ	До 250 тегів на 1 шлюз
Тип радіозв'язку	LTE Cat-M / 5G	Немає	LTE / 2G	BLE 5.x + LTE / NB-IoT
Захист інформації	TLS	Немає	TLS	**HMAC + TLS 1.3 + RBAC**
Інтеграція з ERP/TMS/WMS	REST API, webhooks	Лише ручне сканування	REST API	REST API, MQTT, webhooks
Обслуговування	Зарядка після кожного рейсу	Не потребує (одноразово)	Періодичне ТО	Заміна батарейки 1 раз на 1–2 роки

3.2.1 Аналіз ключових технічних переваг

Поєднання гранулярності та оперативності. Лише два рішення з порівнюваних — Tive Solo 5G та запропоноване — забезпечують одночасно гранулярність до окремої посилки та оперативність даних у режимі реального часу. Однак Tive досягає цього коштом надмірної вартості (за рахунок дублювання LTE-модема в кожному пристрої), тоді як запропоноване рішення зберігає економічну прийнятність за рахунок концентрації LTE на шлюзі.

Радикальне збільшення терміну автономної роботи. Завдяки відсутності енерговитратного LTE-модема у складі тегу автономність запропонованого рішення (19,6 місяців на CR2032) у 6–10 разів перевищує показники Tive Solo 5G (60–90 діб з обов'язковою зарядкою після кожного рейсу). Це усуває цілий пласт операційних витрат на зарядну інфраструктуру.

Розширена функціональність порівняно з GPS-моніторингом. GPS-моніторинг транспортного засобу як цілого не дозволяє розрізняти стан окремих посилок усередині кузова. У разі виявлення пошкодження вантажу неможливо встановити, коли та де воно сталося, який саме пакунок постраждав. Запропоноване рішення розв'язує цю проблему завдяки індивідуальному моніторингу кожної посилки.

Конкурентоспроможна безпека. Запропоноване рішення впроваджує трирівневу модель безпеки (HMAC на BLE, mTLS на WAN, RBAC на застосуванні), яка перевищує типовий рівень захисту у Tive та виглядає особливо контрастно на тлі ShockWatch, де захист обмежений лише фізичною пломбою.

3.2.2 Технічні компроміси

Об'єктивний аналіз вимагає визнання тих параметрів, у яких запропоноване рішення поступається конкурентам. Точність вимірювання температури (± 0,5 °C) дещо нижча за показники Tive Solo 5G (± 0,3 °C), що зумовлено вибором економічніших сенсорів. Однак для більшості логістичних застосувань — включаючи фармацевтичний холодовий ланцюг (вимога ВООЗ — точність ± 1,0 °C) — досягнута точність є цілком достатньою.

Запропоноване рішення вимагає попереднього встановлення шлюзу на транспортний засіб, тоді як Tive є самодостатнім трекером. Однак ця особливість компенсується тим, що шлюз — одноразова інвестиція з амортизацією на 5–7 років та обсягом обслуговування у сотні тегів, тоді як інвестиція в трекер Tive має постійний характер.

3.3 Економічна доцільність впровадження

Економічна доцільність запропонованого рішення випливає безпосередньо з технічних рішень, описаних у попередніх підрозділах. Концентрація LTE-модема на єдиному шлюзі замість його дублювання у кожному пристрої, тривалий термін автономної роботи без обслуговування та масштабованість архітектури формують різке скорочення сумарної вартості володіння (TCO) системою.

Розрахунок TCO виконано для типового сценарію: парк із 10 транспортних засобів, 200 посилок на ТЗ за рейс, 20 рейсів на рік. Розрахунок враховує всі види витрат на повному життєвому циклі — капітальні (обладнання), операційні (M2M-зв'язок, обслуговування) та непрямі (втрати від невиявлених інцидентів). Результати наведено в таблиці 3.2 та на рис. 3.5.

Таблиця 3.2 – Сумарна вартість володіння для парку з 10 ТЗ за 5 років

Стаття витрат, тис. USD	**Tive Solo 5G**	**ShockWatch**	**GPS-моніторинг**	**Запропоноване**
Обладнання (рік 1, CAPEX)	200	10	3	16
M2M-зв'язок за 5 років	300	0	6	3
Заміна / батареї	0	50 / рік	0	8 (1 раз)
Обслуговування	20	0	7	10
Втрати від інцидентів	0 (real-time)	400	400	0 (real-time)
РАЗОМ за 5 років	**520**	**460**	**416**	**≈ 37**

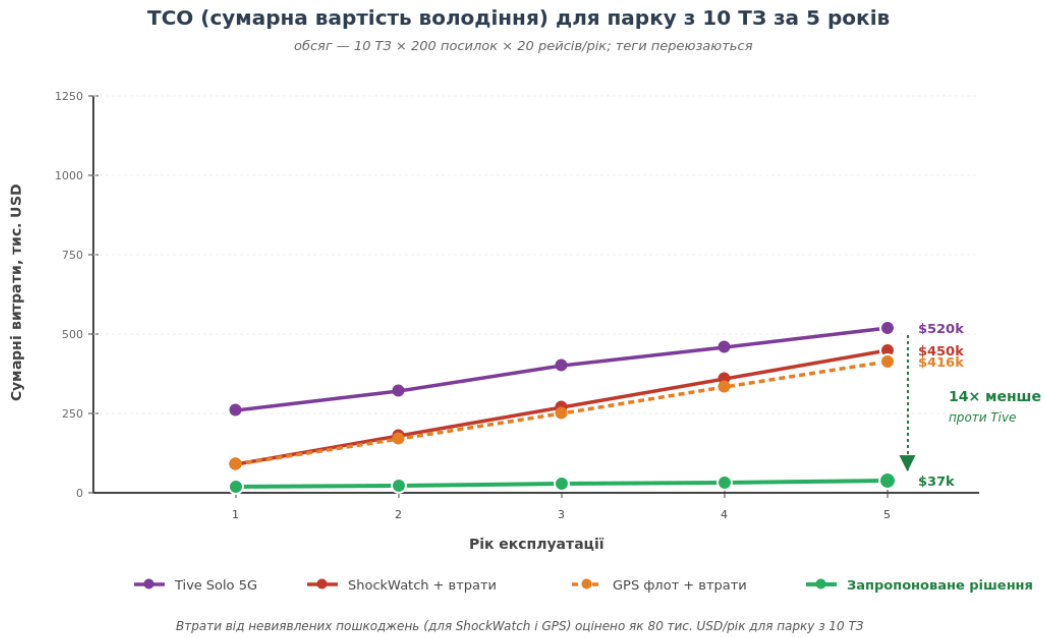


Рисунок 3.5 – Динаміка накопичення сумарної вартості володіння за 5 років

Запропоноване рішення забезпечує сумарну економію у 14 разів порівняно з Tive Solo 5G [16], у 12 разів — порівняно з ShockWatch [19] (з урахуванням втрат від невиявлених інцидентів) та в 11 разів — порівняно з GPS-моніторингом ТЗ [25]. У абсолютних цифрах це означає економію близько 380–480 тисяч доларів США на парку з 10 транспортних засобів за п'ять років експлуатації.

Початкові інвестиції на впровадження запропонованого рішення у парку з 10 ТЗ становлять близько 16 тисяч USD (10 шлюзів × 200 USD + 2000 тегів × 7 USD + інсталяція). При середньорічній економії проти Tive Solo 5G у 96 тисяч USD/рік період окупності інвестицій складає менше 2 місяців експлуатації [23, 24, 26]. Це робить проект економічно надзвичайно привабливим — навіть найбільш консервативні фінансові директори визнають проекти з періодом окупності до 12 місяців обов'язковими до впровадження.

Висновки до розділу 3

У третьому розділі дипломної роботи проведено комплексне обґрунтування технічної життєздатності та порівняльний аналіз ефективності запропонованої архітектури логістичної системи моніторингу. Основними результатами є такі:

1. Обґрунтовано надійність радіопокриття у вантажному відсіку: за моделлю втрат на трасі (формула 3.1) розрахований радіус стійкого BLE-зв'язку становить 5,2 м у режимі 1M PHY та 10,3 м у Coded PHY, що з адаптивним перемиканням режимів забезпечує 100 % покриття стандартного напівпричепа з ймовірністю успішного приймання понад 99 %.

2. Підтверджено енергоефективність архітектури: за енергетичною моделлю (формула 3.2) середній струм споживання тегу становить 12,2 мкА, що забезпечує термін автономної роботи 19,6 місяців на стандартній батареї CR2032 та до 4,4 років на CR2450 — у 6–10 разів довше за професійні аналоги.

3. Доведено оперативність системи: час від моменту критичної події до отримання сповіщення користувачем не перевищує 30 секунд, що відповідає показникам найкращих ринкових рішень (Tive Solo 5G) і у тисячі разів швидше за пасивні засоби (ShockWatch, дата-логери).

4. Показано масштабованість архітектури: концентрація LTE-модема на єдиному шлюзі скорочує кількість критичної радіоінфраструктури у 200 разів при N = 200 посилок на ТЗ, забезпечуючи моніторинг кожної окремої посилки без пропорційного зростання витрат на зв'язок.

5. Виконано порівняння технічних характеристик за десятьма параметрами з трьома основними категоріями ринкових продуктів. Встановлено, що запропоноване рішення є єдиним, яке одночасно забезпечує гранулярність моніторингу до окремої посилки, оперативність у режимі реального часу та масштабованість для масового застосування.

6. Виконано економічну оцінку: ТСО для парку з 10 ТЗ за 5 років становить ≈ 37 тис. USD проти 416–520 тис. USD у аналогів — економія у 11–14 разів. Період окупності інвестицій — менше 2 місяців порівняно з професійним IoT-моніторингом.

Сукупність отриманих результатів дозволяє стверджувати, що запропонована архітектура є технічно реалізованою, інженерно обґрунтованою та економічно ефективною для впровадження в реальній логістичній галузі.

РОЗДІЛ 4

РЕКОМЕНДАЦІЇ ЩОДО ЗАСТОСУВАННЯ МОДИФІКОВАНОЇ АРХІТЕКТУРИ

4.1 Рекомендації за типами вантажів

4.1.1 Електроніка та крихкі вироби

Для перевезень електронної техніки, побутових приладів та інших крихких товарів критично важливим є контроль механічних впливів. Рекомендована конфігурація передбачає знижені пороги детекції удару — THR_1 = 1,0 g (первинна детекція) та THR_2 = 1,5 g (підтверджена подія). Це дозволяє реєструвати навіть невеликі поштовхи, які можуть призвести до прихованих пошкоджень внутрішніх компонентів пристрою.

Рекомендований профіль активності — «Транзит» з періодом 60 секунд під час руху та автоматичним переходом у профіль «Інцидент» (5 секунд) на 10 хвилин після кожного зафіксованого удару. Особливу увагу слід приділити встановленню тегу на упаковку — рекомендується розміщення на бічній грані з найменшою ймовірністю прямого механічного впливу. Для виробів особливо високої вартості доцільно встановлювати два теги на різних гранях для контролю орієнтації пакета під час перевезення.

4.1.2 Фармацевтична продукція та холодовий ланцюг

Перевезення медикаментів, вакцин та інших фармацевтичних препаратів регулюється стандартами GDP (Good Distribution Practice) [21, 22], які вимагають документального підтвердження дотримання температурного режиму на всьому маршруті. Для таких вантажів рекомендується конфігурація з підвищеною увагою до температурного контролю: інтервал опитування датчика температури — 30 секунд (замість стандартних 60), діапазон дозволених значень — від +2 °C до +8 °C для звичайних медикаментів, від −20 °C до −15 °C для глибокозаморожених препаратів.

Поріг спрацювання за температурою — 0,5 °C відхилення від встановленого інтервалу протягом 3 послідовних вимірювань. Така консервативна логіка відсіює короткочасні фальш-спрацювання (наприклад, при відкритті дверей рефрижератора), але надійно реєструє реальні порушення холодового ланцюга. Поріг детекції удару при цьому залишається на стандартному рівні THR_2 = 2,5 g — фармацевтичні упаковки зазвичай стійкі до помірних механічних впливів.

Рекомендується також активація алгоритму виявлення аномалій на серверному рівні з підвищеною чутливістю: z_thr = 2 (замість стандартних 3), m_thr = 2 послідовні вимірювання. Це дозволяє виявляти поступовий дрейф температури при деградації ізоляції холодильної камери, що є типовим режимом відмови, який пасивні дата-логери пропускають.

4.1.3 Харчові продукти та продукти, що швидко псуються

Перевезення харчових продуктів має свою специфіку: для свіжих овочів та фруктів критичним є дотримання температурно-вологісного режиму, для замороженої продукції — стабільність низької температури, для готових страв — короткий термін транспортування. Рекомендована конфігурація передбачає одночасний моніторинг температури та вологості з порогом +4 °C та 70 % відносної вологості для нормального режиму холодильного зберігання.

Поріг детекції удару знижується до THR_2 = 1,5 g — це пов'язано з тим, що навіть незначні удари можуть пошкодити упаковку та призвести до псування продукту. Активується додаткова перевірка фотодіодом для контролю несанкціонованого відкриття упаковки (це критично для скоропсувних готових страв з ризиком підміни). Інтервал опитування — стандартний (60 с), профіль «Транзит» з автоматичним переходом у «Зберігання» при тривалих стоянках на складських терміналах.

4.1.4 Цінні вантажі та коштовності

Для перевезень коштовностей, дорогої електроніки, банківських цінностей та аналогічних високовартісних вантажів пріоритетом є не стільки контроль умов, скільки контроль цілісності упаковки та оперативність сповіщень про спроби

втручання. Рекомендована конфігурація передбачає максимально чутливу детекцію відкриття упаковки через фотодіод (поріг спрацювання — будь-яке зростання освітленості понад 10 лк), а також прискорений профіль «Інцидент» з періодом опитування 1 секунда.

Особливістю конфігурації для цінних вантажів є подвійна перевірка з прив'язкою до маршруту: будь-яка непередбачена зупинка ТЗ (визначається через GNSS на шлюзі) на маршруті в поєднанні з активацією фотодіодів тегів інтерпретується як потенційна спроба крадіжки. Сповіщення формується одразу з рівнем критичності «Critical» та надсилається не лише диспетчеру, але й службі безпеки. Поріг детекції удару підвищується до THR_2 = 3,0 g — для відсіювання звичайних дорожніх вібрацій, які не становлять загрози для упаковки коштовностей.

4.1.5 Зведена таблиця рекомендованих профілів

Для зручності системних інтеграторів та логістичних операторів у таблиці 4.1 узагальнено рекомендовані конфігурації системи для розглянутих типів вантажів.

Таблиця 4.1 – Рекомендовані конфігурації системи за типами вантажів

Тип вантажу	**THR_2 удару, g**	**T опитування, с**	**Активні сенсори**	**Особливості**
Електроніка / крихке	1,5	60	MEMS, T, RH	2 теги на упаковку
Фармацевтика (GDP)	2,5	30 (T)	T (пріоритет), MEMS	z_thr = 2, документування
Харчові продукти	1,5	60	T, RH, фотодіод	Контроль розкриття
Цінні вантажі	3,0	1 (Alert)	MEMS, фотодіод, GNSS	Прив'язка до маршруту

4.2 Поетапне впровадження модифікованої архітектури

4.2.1 Етап 1. Пілотний проект (1–3 транспортних засобів, 2–3 місяці)

На першому етапі система розгортається на обмеженій кількості транспортних засобів — як правило, 1–3 одиниці, що виконують типові маршрути та обслуговують репрезентативну вибірку вантажів. Метою етапу є відпрацювання технічних аспектів встановлення обладнання, налаштування інтеграції з корпоративними системами, навчання персоналу та збір первинної статистики ефективності.

Ключові завдання пілотного етапу: монтаж шлюзів на обрані ТЗ, маркування тестових партій вантажу BLE-тегами, налаштування серверної інфраструктури (хмарної або корпоративної), розробка інтерфейсу інтеграції з існуючою TMS компанії, формування первинного списку користувачів з визначенням ролей RBAC, проведення тренінгу для водіїв, диспетчерів та клієнтів. На цьому етапі активно збирається зворотний зв'язок від користувачів, який буде використано для коригування конфігурації перед масовим розгортанням.

За результатами пілотного етапу формується звіт, що містить кількісну оцінку економічного ефекту (фактичну кількість виявлених інцидентів, кількість попереджених пошкоджень, обсяг фактичного трафіку M2M), технічні зауваження щодо роботи обладнання та пропозиції щодо покращення процесів.

4.2.2 Етап 2. Регіональне розширення (10–30 ТЗ, 6 місяців)

При успішних результатах пілотного етапу система розгортається на регіональному рівні — типово на весь автопарк однієї філії або структурного підрозділу компанії. На цьому етапі вирішуються задачі промислової експлуатації: налагодження масової логістики встановлення обладнання, інтеграція з усіма ключовими корпоративними системами (ERP, TMS, WMS), формування служби технічної підтримки кінцевих користувачів.

Особлива увага приділяється оптимізації операційних процесів навколо системи: впровадження автоматичних робочих процесів реагування на критичні події (наприклад, автоматичне формування акту про пошкодження при

спрацюванні детектора удару), інтеграція даних моніторингу в звітність про якість послуг для клієнтів, накопичення статистичних даних для подальшої аналітики маршрутів та якості перевезень.

4.2.3 Етап 3. Повне впровадження на парк (12–18 місяців)

На завершальному етапі система розгортається на весь парк транспортних засобів компанії. Цей етап триває довше за попередні, оскільки крім фізичного встановлення обладнання включає організаційні зміни — перегляд внутрішніх регламентів роботи з вантажем, оновлення договірних умов з клієнтами (включення параметрів моніторингу в SLA), формування корпоративної культури роботи з даними реального часу.

На цьому етапі типово реалізуються додаткові можливості системи, які не були доступні на пілотних етапах через обмеженість обсягу даних: запуск алгоритмів машинного навчання для прогнозування ризиків, формування рейтингу водіїв та маршрутів за показниками безпеки перевезень, інтеграція з зовнішніми сервісами (страхові компанії, митні органи). Очікуваний термін окупності інвестицій складає 4–6 місяців з моменту повного завершення впровадження, після чого система переходить у режим стабільної експлуатації з періодичним технічним обслуговуванням.

Висновки до розділу 4

У четвертому розділі дипломної роботи сформульовано практичні рекомендації щодо застосування розробленої модифікованої архітектури. Основними результатами є такі:

1. Розроблено параметричні рекомендації за чотирма основними типами вантажів — електроніка та крихкі вироби, фармацевтична продукція, харчові продукти та цінні вантажі. Для кожного типу визначено оптимальні значення порогів детекції, інтервалів опитування, активних сенсорів та особливостей конфігурації. Узагальнено рекомендації у вигляді конфігураційної таблиці 4.1, придатної для безпосереднього використання системними інтеграторами.

2. Запропоновано трирівневу модель поетапного впровадження архітектури у логістичну компанію: пілотний проект (1–3 ТЗ, 2–3 місяці), регіональне розширення (10–30 ТЗ, 6 місяців), повне впровадження (12–18 місяців). Кожен етап має визначені цілі, ключові завдання та критерії переходу до наступного. Така модель мінімізує ризики впровадження та дозволяє поступово оцінювати реальний економічний ефект.

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

У дипломній роботі вирішено актуальну науково-прикладну задачу підвищення якості логістичних перевезень шляхом розробки модифікованої архітектури системи моніторингу стану вантажів на базі технологій Інтернету речей. За результатами виконаного дослідження отримано такі основні результати:

1. Виконано аналіз сучасного стану логістичної галузі та існуючих засобів моніторингу. Виявлено три ключові проблеми — низький рівень цифровізації процесів, нестача інструментів контролю фізичного стану посилок під час перевезення та зростаючі вимоги клієнтів до прозорості доставки. Порівняльний аналіз п'яти класів існуючих рішень (пасивні дата-логери, GPS-моніторинг ТЗ, RFID, ShockWatch, професійні IoT-трекери) показав, що жодне з них не задовольняє одночасно вимогам гранулярності до окремої посилки, оперативності в реальному часі та економічної прийнятності для масового застосування.

2. Розроблено модифіковану архітектуру IoT-системи на базі чотирьох принципів — ієрархічного розподілу функцій, децентралізованого збору з централізованою обробкою, адаптивної поведінки вузлів та межової інтелектуалізації. Архітектура декомпозована на чотири рівні (фізичний, локальний мережевий BLE 5.x, транспортний LTE/NB-IoT, прикладний) з концентрацією усіх енерговитратних компонентів на єдиному шлюзі транспортного засобу замість їх дублювання у кожному пристрої. Спроектовано протокол обміну та трирівневу модель інформаційної безпеки (HMAC на BLE, mTLS на WAN, RBAC на застосуванні).

3. Виконано кількісне обґрунтування технічної життєздатності рішення. За моделлю втрат на трасі підтверджено надійний радіус BLE-зв'язку 5,2–10,3 м, що з адаптивним перемиканням режимів забезпечує 100 % покриття стандартного напівпричепа. За енергетичною моделлю розрахований середній струм споживання тегу 12,2 мкА, що забезпечує термін автономної роботи 19,6 місяців на CR2032 — у 6–10 разів довше за професійні аналоги. Час реакції на критичну подію не

перевищує 30 секунд. Концентрація LTE-модема на шлюзі скорочує кількість критичної радіоінфраструктури у 200 разів.

4. Виконано порівняльний аналіз з трьома основними категоріями ринкових продуктів (Tive Solo 5G, ShockWatch, GPS-моніторинг ТЗ) за десятьма ключовими параметрами. Підтверджено, що запропоноване рішення є єдиним, яке одночасно забезпечує гранулярність моніторингу до окремої посилки, оперативність у режимі реального часу та економічну прийнятність. Економічна оцінка показала ТСО для парку з 10 ТЗ за 5 років близько 37 тис. USD проти 416–520 тис. USD у аналогів — економія у 11–14 разів при періоді окупності інвестицій менше 2 місяців.

5. Сформульовано практичні рекомендації щодо застосування архітектури за чотирма типами вантажів та запропоновано трирівневу модель поетапного впровадження. Окреслено перспективні напрямки подальшого розвитку — імітаційне моделювання, методи машинного навчання для предиктивної аналітики [10, 12] та стандартизація запропонованих рішень [26]. Сукупність отриманих результатів підтверджує, що поставлена мета дипломної роботи повністю досягнута; запропоноване рішення є технічно реалізованим, інженерно обґрунтованим та економічно ефективним для впровадження в реальних логістичних компаніях.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. ДСТУ 3008:2015. Інформація та документація. Звіти у сфері науки і техніки. Структура та правила оформлювання. — Київ: ДП «УкрНДНЦ», 2016. — 26 с.
2. Bluetooth Core Specification Version 5.3 [Електронний ресурс] / Bluetooth Special Interest Group (Bluetooth SIG). — 2021. — Режим доступу: https://www.bluetooth.com/specifications/specs/core-specification-5-3.
3. ISO/IEC 30141:2018. Internet of Things (IoT) — Reference Architecture. — Geneva: ISO, 2018. — 86 p.
4. Banks A. MQTT Version 3.1.1 / A. Banks, R. Gupta. — OASIS Standard, 2014. — 81 p.
5. Rescorla E. The Transport Layer Security (TLS) Protocol Version 1.3. — RFC 8446, IETF, 2018. — 160 p.
6. Krawczyk H. HMAC: Keyed-Hashing for Message Authentication / H. Krawczyk, M. Bellare, R. Canetti. — RFC 2104, IETF, 1997. — 11 p.
7. 3GPP TS 36.300. Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA) and Evolved Universal Terrestrial Radio Access Network (E-UTRAN); Overall description. — Release 17. — 3rd Generation Partnership Project, 2023.
8. IEEE 802.15.4-2020. IEEE Standard for Low-Rate Wireless Networks. — New York: IEEE, 2020. — 800 p.
9. Rappaport T. S. Wireless Communications: Principles and Practice. — 2nd ed. — Upper Saddle River, NJ: Prentice Hall, 2002. — 736 p.
10. Atzori L. The Internet of Things: A survey / L. Atzori, A. Iera, G. Morabito // Computer Networks. — 2010. — Vol. 54, No. 15. — P. 2787–2805.
11. Shi W. Edge Computing: Vision and Challenges / W. Shi, J. Cao, Q. Zhang, Y. Li, L. Xu // IEEE Internet of Things Journal. — 2016. — Vol. 3, No. 5. — P. 637–646.
12. Khan W. Z. Industrial Internet of Things: Recent advances, enabling technologies and open challenges / W. Z. Khan, M. H. Rehman, H. M. Zangoti, M. K. Afzal, N.

Armi, K. Salah // Computers and Electrical Engineering. — 2020. — Vol. 81. — P. 106522.

13. Sethi P. Internet of Things: Architectures, Protocols, and Applications / P. Sethi, S. R. Sarangi // Journal of Electrical and Computer Engineering. — 2017. — Vol. 2017. — Article ID 9324035. — 25 p.
14. Yick J. Wireless sensor network survey / J. Yick, B. Mukherjee, D. Ghosal // Computer Networks. — 2008. — Vol. 52, No. 12. — P. 2292–2330.
15. Karagiannis V. A Survey on Application Layer Protocols for the Internet of Things / V. Karagiannis, P. Chatzimisios, F. Vazquez-Gallego, J. Alonso-Zarate // Transaction on IoT and Cloud Computing. — 2015. — Vol. 1, No. 1. — P. 11–17.
16. Tive Inc. Tive Solo 5G Real-Time Tracker Technical Specifications [Електронний ресурс]. — Режим доступу: https://www.tive.com/products/tive-solo-5g.
17. Roambee Corporation. BeeBeacon Real-Time Tracking Devices [Електронний ресурс]. — Режим доступу: https://www.roambee.com/devices.
18. Hanhaa Ltd. ParceLive Real-Time Package Tracking [Електронний ресурс]. — Режим доступу: https://www.hanhaa.com/parcelive.
19. ShockWatch Inc. Damage Indicators and Impact Monitoring Solutions [Електронний ресурс]. — Режим доступу: https://www.shockwatch.com/products.
20. Nordic Semiconductor. nRF52840 Multiprotocol Bluetooth 5.4 SoC Product Specification [Електронний ресурс]. — Режим доступу: https://www.nordicsemi.com/Products/nRF52840.
21. World Health Organization. WHO Good Distribution Practices for Pharmaceutical Products: Technical Report Series No. 957, Annex 5. — Geneva: WHO, 2010. — 26 p.
22. European Commission. Guidelines on Good Distribution Practice of Medicinal Products for Human Use (2013/C 343/01) // Official Journal of the European Union. — 2013.

23. Малярчук Я. С. Тенденції розвитку IoT-технологій у логістичній галузі України / Я. С. Малярчук, О. М. Кравчук // Економіка та держава. — 2023. — № 4. — С. 78–84.
24. Шевченко В. М. Цифровізація логістичних процесів в умовах сучасного ринку / В. М. Шевченко // Економіка України. — 2022. — № 3. — С. 45–58.
25. Кравченко І. С. Сучасні підходи до моніторингу транспортних перевезень / І. С. Кравченко, Д. О. Петренко // Збірник наукових праць НДІ телекомунікацій. — 2023. — Вип. 14. — С. 112–125.
26. Ященко М.В., Курдеча В.В. Модифікована архітектура системи інтернету речей для логістичних перевезень // Перспективи розвитку інформаційно-телекомунікаційних технологій та систем (ПРІТС-2026) : тези XVIII наук.-техн. конф. студентів та аспірантів, 13–17 квіт. 2026 р., Київ. – Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2026. – С. 424.