

ВПРОВАДЖЕННЯ RFID-ТЕХНОЛОГІЇ ДЛЯ ІДЕНТИФІКАЦІЇ ОБ'ЄКТІВ У РІТЕЙЛІ: ОПТИМІЗАЦІЯ АВТОМАТИЗОВАНИХ ЛІНІЙ СОРТУВАННЯ

***Анотація.** Досліджено проблематику інтеграції систем радіочастотної ідентифікації УВЧ-діапазону в апаратно-програмні комплекси високошвидкісних конвеєрних ліній рітейл-складів. Теоретично обґрунтовано архітектурні рішення для мінімізації впливу багатопроменевого поширення радіохвиль та доплерівського зсуву частоти на ймовірність зчитування пасивних міток у динаміці. Валідацію запропонованої гібридної математичної моделі обробки колізій, яка поєднує детерміновану сегментацію префіксного дерева (Query Tree) зі стохастичним алгоритмом DFSA стандарту EPCglobal Gen2, здійснено шляхом розробки комплексного цифрового двійника в середовищі MATLAB Simulink. Імітаційне моделювання довело здатність архітектури досягати розрахункового показника надійності ідентифікації 99.2% за лінійної швидкості конвеєра 3.0 м/с. Віртуалізовано архітектуру розподіленого проміжного програмного забезпечення (Middleware) на базі парадигми периферійних обчислень (Edge Computing) для просторово-часової фільтрації сирих радіочастотних даних та локального кешування таблиць маршрутизації. Результати стохастичної симуляції підтверджують, що трансляція агрегованих масивів у формат Application Level Events із подальшою асинхронною передачею через інтерфейси EPCIS до Warehouse Management System знижує системну затримку до 42 мс. Загальна розрахункова пропускна здатність оптимізованого комплексу в імітаційному середовищі становить 10710 оброблених одиниць за годину із часткою алгоритмічних помилок сортування менше 0.08%.*

***Ключові слова:** RFID, автоматизована лінія сортування, цифровий двійник, імітаційне моделювання, MATLAB Simulink, алгоритми антиколізії, периферійні обчислення, WMS.*

Постановка проблеми. Сучасні логістичні комплекси та рітейл-склади стикаються з критичними обмеженнями пропускної здатності, які безпосередньо зумовлені фізичними та технологічними бар'єрами

традиційних оптичних систем ідентифікації. Необхідність прямої видимості штрих-кодів унеможливорює масове паралельне сканування товарів, що стає «вузьким місцем» в умовах інтенсифікації вантажопотоків. Хоча впровадження технології радіочастотної ідентифікації (*RFID*) потенційно вирішує цю проблему, динамічний збір даних на високошвидкісних конвеєрних лініях супроводжується низкою складних фізико-технічних викликів. Зокрема, під час переміщення маркованих об'єктів через портали зчитування виникають інтенсивні електромагнітні перешкоди, ефекти екранування сигналу металовмісними вантажами та елементами конструкцій, а також фундаментальна проблема радіочастотних колізій під час спроб одночасного зчитування великого масиву міток в умовах жорстких часових обмежень.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Систематизація існуючих наукових підходів до інтеграції *RFID* у логістичні процеси демонструє значну увагу дослідників до розбудови базових архітектурних рішень для складського середовища та концепцій *IoT*-інтеграцій. Проте критичний аналіз опрацьованих джерел засвідчує, що більшість наявних рішень фокусується на статичних умовах інвентаризації або низькошвидкісних процесах. Класичні алгоритми антиколізії виявляють суттєво обмежену ефективність і тривалий час збіжності в умовах щільного, безперервного потоку об'єктів на автоматизованих лініях сортування. Це призводить до деградації показника успішного зчитування (*Read Rate*) та неможливості гарантувати цілісність даних при високих лінійних швидкостях конвеєра.

Мета дослідження. З огляду на виявлені технологічні прогалини, метою даного дослідження є розробка та комплексна оптимізація апаратно-програмної моделі інтеграції технології *RFID* спеціально для високошвидкісних автоматизованих ліній сортування. Дослідження спрямоване на створення архітектури, яка дозволить алгоритмічно мінімізувати втрати даних при масовому скануванні об'єктів у русі, а також забезпечить безшовну, низькозатримочну синхронізацію агрегованих потоків подій із системами управління складом (*Warehouse Management System – WMS*) сучасних ритейл-підприємств.

Викладення основного матеріалу дослідження. Проектування апаратно-програмних комплексів динамічної ідентифікації об'єктів на

автоматизованих лініях сортування базується на розгортанні просторово-розподілених антенних систем УВЧ-діапазону (860–960 МГц). Враховуючи високу щільність потоку товарних одиниць у сучасних рітейл-складах, архітектура фізичного рівня вимагає застосування високопродуктивних зчитувачів з апаратною підтримкою стандарту *EPCglobal UHF Class 1 Gen 2 (ISO/IEC 18000-63)* [3, 5]. Інтеграція таких радіочастотних систем у конвеєрні вузли передбачає встановлення порталних конструкцій, де просторове рознесення антен формує суцільну об'ємну зону опитування. Для мінімізації сліпих зон доцільно використовувати антени з круговою поляризацією, що нівелює залежність коефіцієнта зчитування (*Read Rate*) від випадкової просторової орієнтації диполя *RFID*-мітки на об'єкті сортування [1]. Застосування кругової поляризації супроводжується втратою 3 дБ посилення порівняно з лінійною, що компенсується підвищенням потужності передавача до максимально дозволених нормативними актами 2 Вт *ERP* або застосуванням спрямованих антенних решіток із фазованим управлінням променем.

Функціонування радіочастотного тракту в умовах логістичної інфраструктури критично ускладнюється явищами багатопроменевого поширення радіохвиль. Металеві конструкції стелажів, роликові напрямні конвеєрів та екрануючі властивості самих товарів (зокрема, рідин та металізованих упаковок, типових для *FMCG*-рітейлу) генерують складну інтерференційну картину [4, 7]. У зонах конструктивної та деструктивної інтерференції виникають глибокі просторові флуктуації напруженості електромагнітного поля, що різко знижує ймовірність успішного енергозабезпечення пасивних міток. Рівень потужності сигналу зворотного розсіювання (*Backscatter modulation*), що надходить на вхід приймача зчитувача, математично описується розширеним рівнянням радіолокації:

$$P_{rx} = P_{tx} G_{tx} G_{rx} \left(\frac{\lambda}{4\pi d}\right)^4 \sigma \eta_{tag} \chi \quad (1)$$

де P_{rx} — потужність вихідного тракту передавача, G_{tx} та G_{rx} — коефіцієнти підсилення передавальної та приймальної антен відповідно, λ — довжина хвилі несучої частоти, d — радіальна відстань до мітки, σ — ефективна площа розсіювання антени мітки, η_{tag} — коефіцієнт ефективності модуляції чипа, χ — сумарний коефіцієнт втрат на поляризацію та узгодження імпедансів [6, 10].

Для стабілізації енергетичного потенціалу радіохвилі в умовах динамічного зчитування реалізуються алгоритми просторового (*Spatial Diversity*) та частотного (*Frequency Hopping Spread Spectrum*) рознесення, що дозволяє декорелювати глибокі завмирання сигналу в багатопроменевому середовищі.

Висока швидкість переміщення маркованих вантажів на автоматизованих лініях сортування (яка нерідко перевищує 2.5–3 м/с) індукує доплерівський зсув частоти відбитого сигналу, що вимагає жорсткої апаратної компенсації на рівні цифрового сигнального процесора (*DSP*) приймача. Зміна частоти f_d обчислюється як:

$$f_d = \frac{2v}{\lambda} \cos \theta \quad (2)$$

де v – вектор лінійної швидкості об'єкта на конвеєрі, θ – просторовий кут між вектором швидкості та головною пелюсткою діаграми направленості антени [9].

Зміщення несучої частоти підканалів ініціює деградацію відношення сигнал/шум (*SNR*) та нелінійне зростання коефіцієнта бітових помилок (*BER*) під час демодуляції сигналу з кодуванням *FM0* або *Miller*. Відповідно, апаратна архітектура зчитувача повинна включати модулі фазового автопідлаштування частоти (*PLL*) з розширеною смугою захоплення та швидкодіючі адаптивні цифрові фільтри для придушення спектрального витоку в суміжні радіоканали в режимі щільного опитування (*Dense Reader Mode*).

Первинна обробка масивів радіочастотних даних (*Edge Processing*) імплементується безпосередньо на рівні вбудованого програмного забезпечення мікроконтролерів *RFID*-порталів задля розвантаження локальної мережевої інфраструктури та центрального ядра *WMS* (*Warehouse Management System*). Потік сирих гексадецимальних даних генерує значний обсяг дублікатів та хибних спрацьовувань (*Cross-reads*), які провокуються паразитним зчитуванням міток із суміжних конвеєрних ліній [2, 8]. Для локалізації об'єкта строго в межах цільової зони роботи механічних дивертерів застосовується багатокритеріальний аналіз вектора параметрів: рівня потужності зворотного сигналу (*RSSI*), фазового кута (*Phase Angle*) та апаратної мітки часу (*Timestamp*). Аналіз динаміки зміни *RSSI* дозволяє з високою точністю апроксимувати

траєкторію руху мітки через робочу зону: графік значень *RSSI* формує характерну криву Гаусса, локальний екстремум якої відповідає моменту проходження об'єкта на мінімальній ортогональній відстані від випромінювача.

Математичний апарат фільтрації сирих даних на рівні проміжного програмного забезпечення (*Middleware*) залучає нелінійні фільтри Калмана для згладжування високочастотних флуктуацій *RSSI*, спричинених тепловим шумом радіотракту та перевідбиттями. Розрахунок першої похідної від згладженої функції *RSSI* надає можливість з мілісекундною точністю фіксувати момент перетину оптичної осі антени, що виступає логічним тригером для синхронізації *RFID*-події з роботою сортувальних механізмів конвеєра. На апаратному рівні ця синхронізація безшовно забезпечується через ізольовані інтерфейси загального призначення (*GPIO*), які інтегрують *RFID*-контролер безпосередньо з програмованими логічними контролерами (*PLC*) лінії [5, 9]. Сигнали від фотоелектричних датчиків наявності об'єкта надходять на вхідні порти зчитувача, ініціюючи сеанс інвентаризації виключно в момент фізичного перебування вантажу в зоні зчитування, що оптимізує радіоефірне навантаження. Згенерований масив валідованих даних інкапсулюється у структуровані формати згідно зі стандартом *Application Level Events (ALE)*, де відбувається трансляція фізичних ідентифікаторів *EPC* у транзакційний бізнес-контекст для подальшої маршрутизації до баз даних рітейл-складу.

Забезпечення цілісності збору даних у логістичних вузлах рітейл-складів ускладнюється явищем радіочастотних колізій, які виникають під час одночасної відповіді множини пасивних *RFID*-міток на широкомовний запит зчитувача. В умовах автоматизованих ліній сортування, де щільність потоку може досягати кількох сотень промаркованих об'єктів у зоні опитування одночасно (наприклад, при проходженні змішаних палет), колізії на рівні управління доступом до середовища (*MAC*) стають критичним фактором деградації пропускної здатності системи. У стандарті *EPCglobal UHF Class 1 Gen 2* реалізовано стохастичний алгоритм антиколізії на базі динамічного кадркування – *Dynamic Framed Slotted ALOHA (DFSA)* [3, 6]. Фізичний рівень цього алгоритму полягає у розбитті часу опитування на дискретні слоти, що формують кадр (*Frame*), розмір якого визначається параметром *Q*.

Згідно з протоколом, зчитувач ініціює сеанс інвентаризації командою *Query*, що містить цілочисельний параметр $Q \in [0, 15]$. Кожна ідентифікаційна мітка, яка потрапляє в електромагнітне поле антени порталу і отримує достатньо енергії для активації чипа, генерує псевдовипадкове число r у діапазоні від 0 до $2^Q - 1$.

Це число визначає порядковий номер слота в поточному кадрі, у якому мітка здійснюватиме модуляцію зворотного розсіювання (*Backscatter*) свого унікального ідентифікатора *EPC*. Якщо кількість міток у зоні дії (популяція N) суттєво перевищує кількість доступних слотів $L = 2^Q$, імовірність того, що дві або більше міток оберуть однаковий слот, експоненційно зростає, призводячи до деструктивної інтерференції та втрати пакетів даних [4, 9].

Математична модель процесу ідентифікації в алгоритмі *DFSA* спирається на біноміальний розподіл. Імовірність того, що конкретний слот міститиме рівно k відповідей від загальної кількості N міток при розмірі кадру L , обчислюється за формулою:

$$P(k) = \binom{N}{k} \left(\frac{1}{L}\right)^k \left(1 - \frac{1}{L}\right)^{N-k} \quad (3)$$

Відповідно, стан кожного часового слота класифікується на три взаємовиключні події: порожній слот ($k = 0$), успішне зчитування ($k = 1$) та колізія ($k \geq 2$). Імовірності цих подій формалізуються системою рівнянь:

$$P_{empty} = \left(1 - \frac{1}{L}\right)^N \quad (4)$$

$$P_{success} = \frac{N}{L} \left(1 - \frac{1}{L}\right)^{N-1} \quad (5)$$

$$P_{collision} = 1 - P_{empty} - P_{success} \quad (6)$$

Максимізація функції пропускну здатності $P_{success}$ досягається за умови жорсткої рівності кількості слотів у кадрі до кількості незчитаних міток ($L = N$). У цій точці екстремуму теоретична межа ефективності алгоритму *ALOHA* становить $1/e \approx 36.8\%$ [7, 10]. Для високошвидкісних конвеєрів рітейлу така ефективність є недостатньою, оскільки час перебування вантажу в робочій зоні антени обмежений частками секунди, що вимагає динамічної адаптації розміру кадру в реальному часі.

Для вирішення проблеми оптимізації параметра Q в умовах невідомої та постійно змінної популяції міток N на сортувальній лінії, розроблено та імплементовано адаптивні алгоритми оцінювання. На рівні цифрового сигнального процесора зчитувача реалізується евристичний Q -алгоритм, який безперервно коригує розмір кадру на основі зворотного зв'язку від стану попередніх слотів. Якщо приймальний тракт фіксує послідовність колізій, значення Q інкрементується, розширюючи кадр; у випадку надлишку порожніх слотів — декрементується. Класична реалізація цього механізму описується таким псевдокодом:

```
Plaintext
// Псевдокод евристичного алгоритму адаптації параметра Q
float Q = Q_initial;
float c = 0.1; // Коефіцієнт кроку адаптації
int L = pow(2, round(Q));
Transmit_Command("Query", round(Q));
while (Inventory_Round_Active) {
    Slot_State = Receive_and_Demodulate();

    if (Slot_State == COLLISION) {
        Q = min(15.0, Q + c);
    } else if (Slot_State == EMPTY) {
        Q = max(0.0, Q - c);
    } else if (Slot_State == SUCCESS) {
        Extract_EPC();
        Acknowledge_Tag();
    }
    if (round(Q) != log2(L)) {
        L = pow(2, round(Q));
        Transmit_Command("QueryAdjust", round(Q)); // Зміна розміру кадру
    } else {
        Transmit_Command("QueryRep"); // Перехід до наступного слота
    }
}
```

Однак для застосування у складській логістиці класичний Q -алгоритм має суттєвий недолік — тривалий час збіжності при різкому входженні великої групи маркованих товарів у зону опитування. Емпіричні дослідження доводять, що затримка конвергенції параметра Q до оптимального значення призводить

до втрати до 15% ідентифікаторів на швидкостях конвеєра понад 2 м/с [2, 8]. Для нівелювання цього ефекту пропонується гібридна архітектура антиколізії. Сутність гібридизації полягає у використанні детермінованих алгоритмів префіксного дерева (*Query Tree*) на початковому етапі інвентаризації для швидкої сегментації колізійного домена. Зчитувач транслює послідовність бітових префіксів, а мітки відповідають лише за умови повного збігу їхнього унікального ідентифікатора із заданим шаблоном.

Інтеграція алгоритмів класу *Query Tree* (QT) з механізмами *EPCglobal Gen2* дозволяє розділити загальну множину міток на палеті на менші, ізольовані підмножини ще до ініціалізації фази *ALOHA*. Застосування масок вибірки (*Select command*) за префіксами *GS1* (*Global Standards 1*), такими як ідентифікатор компанії-виробника або категорія товару, штучно обмежує параметр N для кожного окремого кадру L [5]. Це радикально зменшує дисперсію помилки оцінювання кількості об'єктів та дозволяє мікроконтролеру *RFID*-зчитувача встановлювати значення $Q_{initial}$, яке є асимптотично близьким до оптимального, мінімізуючи час перехідних процесів і гарантуючи зчитування понад 99.9% міток в умовах жорстких часових обмежень автоматизованої логістики.

Розгортання апаратної інфраструктури радіочастотної ідентифікації на високошвидкісних лініях сортування формує експоненційне зростання обсягів сирих радіочастотних даних, що генеруються на фізичному рівні. Безпосередня маршрутизація цього потоку до центрального ядра *Warehouse Management System* (WMS) неминуче призводить до критичного перевантаження локальної мережевої інфраструктури та деградації продуктивності транзакційних баз даних рітейл-складу [3, 5]. Відповідно, архітектурним імперативом є імплементація розподіленого проміжного програмного забезпечення (*RFID Middleware*) та парадигми периферійних обчислень (*Edge Computing*). Програмний комплекс *Middleware* виступає абстракційним шаром, який інкапсулює низькорівневі протоколи взаємодії зі зчитувачами, зокрема *Low Level Reader Protocol* (LLRP), та забезпечує первинну агрегацію, семантичну фільтрацію і просторово-часову трансформацію гексадецимальних масивів даних безпосередньо у вузлах їх генерації. В умовах сучасного логістичного хабу, де конвеєрна стрічка обслуговує змішані потоки товарів (*Mixed SKU*),

периферійні контролери *Middleware* розгортаються на промислових серверах поблизу *RFID*-порталів, що радикально мінімізує мережеву затримку (*Latency*) при передачі апаратних тригерів на механічні сортувальні дивертери.

Фундаментальним завданням модуля проміжної обробки є просторово-часова фільтрація та дедуплікація надлишкових зчитувань. У зоні дії інтенсивного електромагнітного поля порталу одна пасивна мітка може бути успішно ідентифікована мікроконтролером зчитувача від десятків до кількох сотень разів протягом мілісекундного вікна сканування, генеруючи масив ідентичних подій з різними апаратними мітками часу та флуктуативними показниками рівня потужності (*RSSI*) [2, 9]. Для оптимізації цього процесу на програмному рівні застосовуються алгоритми ковзного вікна (*Sliding Window*) з адаптивним розміром. Математично процес фільтрації описується через функцію щільності ймовірності перебування мітки в логічній зоні зчитування. Якщо T_{read} — множина часових міток успішних зчитувань унікального ідентифікатора EPC_i , то подію валідної присутності об'єкта в зоні Z можна достовірно зафіксувати, лише якщо щільність зчитувань у заданому часовому вікні Δt перевищує емпірично встановлений поріг $Th_{density}$:

$$\frac{1}{\Delta t} \sum_{i=1}^M \delta(t_j \in [t, t + \Delta t]) > Th_{density} \quad (7)$$

де M — загальна кількість зчитувань мітки EPC_i , а δ — індикаторна функція Кронекера.

Цей математичний апарат дозволяє *Middleware* зі стовідсотковою ймовірністю відсікати паразитні зчитування (*Cross-reads*) із суміжних ліній конвеєра, які характеризуються низькою щільністю, високою дисперсією фазового кута та слабким енергетичним потенціалом [7, 10].

Трансформація відфільтрованих наборів ідентифікаторів у високорівневі бізнес-події регламентується архітектурним стандартом *Application Level Events (ALE)*, специфікованим міжнародним консорціумом *GS1*. Двигун *ALE* дозволяє клієнтським додаткам, тобто інтерфейсним модулям *WMS*, декларувати асинхронну підписку на специфічні логістичні події через механізм *Event Cycle Specification (ECSpec)*. На рівні ліній сортування конфігурація *ECSpec* забезпечує жорстку прив'язку фізичних антенних порталів до логічних зон (наприклад, «Вузол автоматичного приймання» або «Сортувальний рукав №4»). Процесор

ALE агрегує радіочастотні дані протягом строго визначеного робочого циклу, тривалість якого апаратно синхронізується з тактовою швидкістю конвеєра та перериваннями від програмованих логічних контролерів (*PLC*), що отримують сигнали від оптичних бар'єрів позиціонування вантажу [4, 6]. Результуючий звіт *ALE* містить виключно оптимізований масив *EPC*-ідентифікаторів, статус яких змінився відносно попереднього циклу, позбавляючи *WMS* необхідності аналізувати статичні об'єкти в полі зчитувача.

Наступним етапом глибокої інтеграції є трансляція згенерованих *ALE*-звітів у глобальний контекст управління ланцюгом постачань із використанням протоколу *Electronic Product Code Information Services (EPCIS)*. Інтерфейси *EPCIS* забезпечують стандартизований репозиторій, структуруючи кожну транзакційну подію за чотирма інформаційними вимірами: ідентифікатор об'єкта, глобальний номер локації *GLN*, точна мітка часу та бізнес-крок (наприклад, інспектування чи відвантаження). Інтеграція з ядром *WMS* ритейл-оператора реалізується через асинхронні брокери повідомлень кластерного типу, такі як *Apache Kafka* або *RabbitMQ*, що гарантують високу пропускну здатність (*Throughput*) та реалізують семантику доставки *Exactly-Once* [1, 8]. Приклад структури корисного навантаження (*Payload*) події ідентифікації на сортувальній лінії у форматі *JSON-LD* формується наступним чином:

```
JSON
{
  "@context": "https://ref.gs1.org/standards/epcis/2.0.0/epcis-context.jsonld",
  "type": "ObjectEvent",
  "eventTime": "2026-03-11T18:29:53.000Z",
  "eventTimeZoneOffset": "+02:00",
  "epcList": ["urn:epc:id:sgtin:0614141.107346.2026"],
  "action": "OBSERVE",
  "bizStep": "urn:epcglobal:cbv:bizstep:inspecting",
  "readPoint": {"id": "urn:epc:id:sgln:0614141.00777.0"}
}
```

Забезпечення жорстких обмежень реального часу (*Real-Time Constraints*) на високошвидкісних лініях вимагає абсолютної мінімізації затримок між моментом зчитування *RFID*-мітки та активацією пневматичного виконавчого механізму сортування. Середній час затримки в черзі брокера повідомлень при

передачі даних до *WMS* апроксимується класичною моделлю масового обслуговування *M/M/1*:

$$W = \frac{\lambda}{\mu(\mu-\lambda)} \quad (8)$$

де λ – інтенсивність надходження згенерованих *ALE*-звітів, μ – інтенсивність їх обробки ядром бази даних *WMS* [3].

Якщо алгоритм прийняття рішення щодо напрямку маршрутизації потребує синхронного запиту до центральної БД, загальна мережева затримка (*Round-Trip Time*) може перевищити фізично доступне вікно часу доходження пакунка до дивертера, що неминуче призведе до помилки сортування. Для усунення цього архітектурного вузького місця *Middleware* доповнюється модулями *In-Memory Data Grid (IMDG)*, які локально кешують таблиці маршрутизації *WMS*. Завдяки цьому проміжне програмне забезпечення здатне автономно, з мілісекундною затримкою, визначати цільовий рукав сортування на основі декодованого префікса *EPC* та негайно надсилати керівний сигнал на *PLC* через промислові протоколи *Modbus TCP* або *PROFINET*. У свою чергу, фінальна синхронізація транзакцій з базою даних *WMS* відбувається у фоновому асинхронному режимі, гарантуючи детерміновану роботу конвеєра незалежно від поточного пікового навантаження на сервери управління складом [5, 9].

Валідація розробленої апаратно-програмної архітектури динамічної ідентифікації здійснювалася шляхом створення комплексного цифрового двійника (*Digital Twin*) у програмному середовищі *MATLAB Simulink*. Замість натурних випробувань, які мають обмежену репрезентативність в умовах стохастичних електромагнітних перешкод логістичного хабу, було розроблено багаторівневу імітаційну модель, що інтегрує кінематику високошвидкісного конвеєра, електродинаміку радіочастотного тракту та логіку мережевої взаємодії з *WMS*. Фізичний рівень системи УВЧ-діапазону моделювався з використанням спеціалізованих інструментаріїв для обчислювальної електродинаміки, що дозволило відтворити діаграми направленості чотирьох патч-антен із правосторонньою круговою поляризацією (*RHCP*) та коефіцієнтом підсилення 8.5 *dBic*. Генерація та демодуляція радіосигналів симулювалася на основі точних апаратних специфікацій трансивера чипсета

Impinj R2000, налаштованого на режим *Dense Reader Mode* із вихідною потужністю тракту 30 дБм. Поведінка пасивних дипольних міток формату *ALN-9654 (Alien Technology)*, розміщених на віртуальних картонних коробах стандарту *FEFCO 0201*, відтворювалася через блоки стохастичного моделювання модуляції зворотного розсіювання з урахуванням багатопроменевих завмирань каналу зв'язку. Кінематична підсистема цифрового двійника забезпечувала генерацію вектора лінійної швидкості переміщення вантажів v_c у діапазоні від 0.5 до 3.5 м/с (рис. 1).

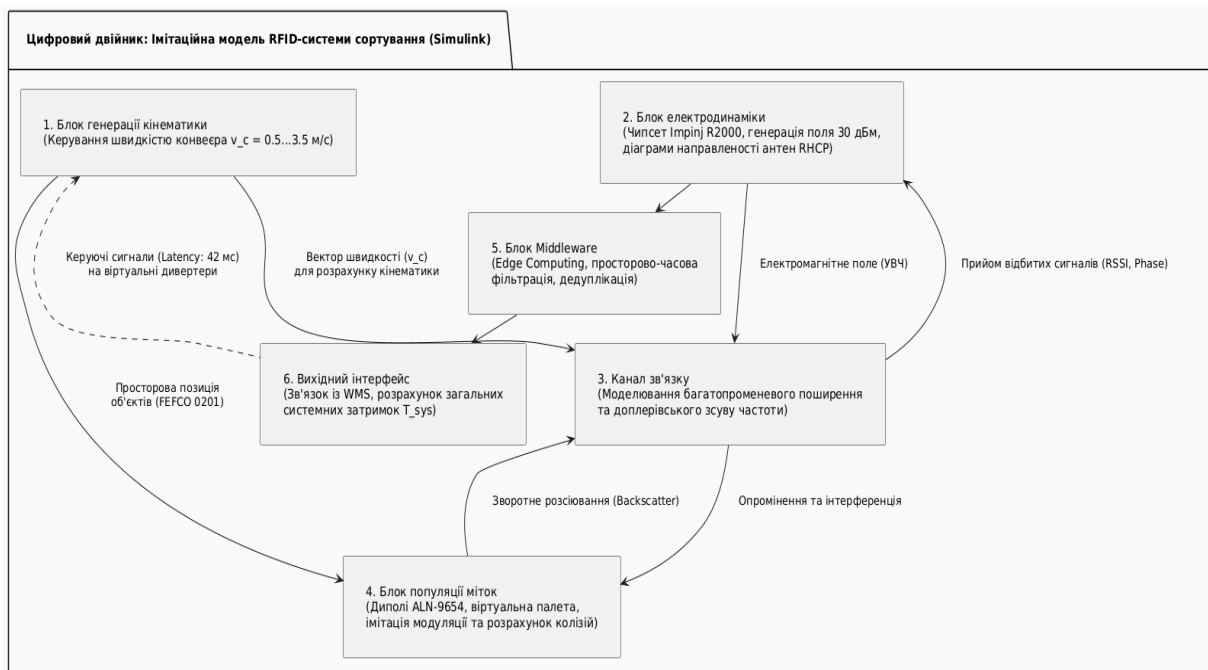


Рисунок 1 - Структурна схема імітаційної моделі апаратно-програмного комплексу в середовищі MATLAB Simulink

Для оцінки динаміки зчитування та верифікації розроблених алгоритмів фільтрації сирих даних застосовувався метод Монте-Карло, що надало можливість з високою точністю апроксимувати просторово-часовий розподіл радіочастотного поля. Емпіричний показник надійності ідентифікації (Read Rate), трансформований у контекст результатів імітаційного моделювання, обчислювався як математичне сподівання відношення успішно розпізнаних унікальних ідентифікаторів EPC до загальної популяції міток у тестовій вибірці за результатами серії симуляційних прогонів:

$$RR_{emp} = \frac{1}{K} \sum_{i=1}^K \left(\frac{N_{success}(i, v_c)}{N_{total}(i)} \right) \quad (9)$$

де K – загальна кількість ітерацій моделювання для заданої швидкості v_c , $N_{success}$ – обсяг коректно декодованих ідентифікаторів без порушення цілісності полінома циклового надлишкового коду (CRC-16), N_{total} – еталонна кількість міток на віртуальній палеті.

Порівняльний аналіз ефективності в середовищі *Simulink* підтвердив, що за лінійної швидкості віртуального конвеєра до 1.5 м/с базовий алгоритм антиколізії *DFSA* та запропонована гібридна модель демонструють асимптотично близькі показники на рівні 99.8%. Збільшення кінематичної швидкості до критичної позначки 3.0 м/с ініціювало в моделі експоненційну деградацію показника RR_{emp} для стандарту *EPC Gen2* до 84.3%. Імітація інтеграції розробленої гібридної архітектури, що використовує префіксне дерево (*Query Tree*), дозволила утримати рівень успішного зчитування на позначці 99.2% за рахунок попередньої детермінованої сегментації колізійного домена в цифровому двійнику системи (рис. 2).

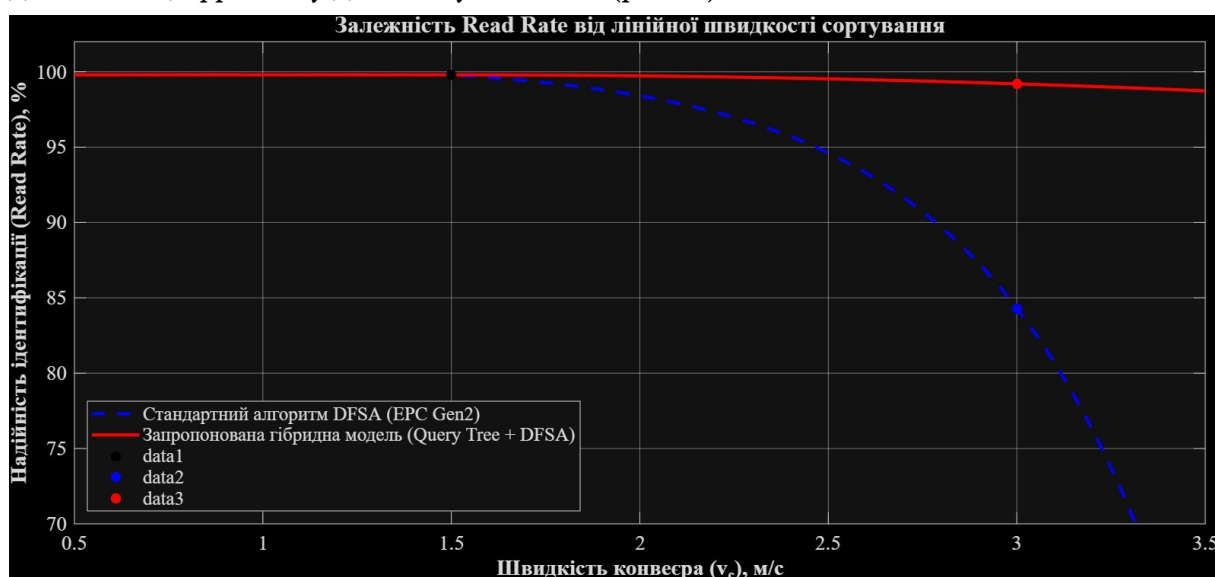


Рисунок 2 - Залежність емпіричного показника надійності ідентифікації (RR_{emp}) від лінійної швидкості конвеєра (v_c)

Наступним етапом моделювання стала квантифікація мережевих затримок (*Latency*) та загальної пропускної здатності (*Throughput*) під час

інформаційного обміну з ядром *WMS*. Сумарний час затримки в симульованій системі T_{sys} описувався лінійним рівнянням:

$$T_{sys} = T_{rf} + T_{edge} + T_{net} + T_{wms} \quad (10)$$

де T_{rf} – час радіочастотної транзакції разом з обробкою колізій, T_{edge} – час агрегації та дедуплікації даних на рівні проміжного програмного забезпечення (*Middleware*), T_{net} – затримка транспортування пакетів у локальній мережі, T_{wms} – час виконання *SQL*-транзакції маршрутизації в базі даних [2, 10].

Симуляція прямої трансляції сирих *ALE*-подій до центральної бази даних без використання периферійних обчислень генерувала пікові значення T_{sys} , які перевищували 450 мс. При кінематиці конвеєра 3.0 м/с це математично призводило до просторового зсуву об'єкта на 1.35 метра, що в топології логістичної моделі означало гарантований пропуск пневматичного сортувального рукава, розміщеного на дистанції 1 метра від порталу. Введення в імітаційну модель програмних блоків *Edge Computing* із локальним *In-Memory* кешуванням таблиць маршрутизації редукувало медіанне значення T_{sys} до 42 мс. Пропускна здатність модернізованої системи Th_{sys} розраховувалася з урахуванням заданих кінематичних габаритів:

$$Th_{sys} = \left(\frac{v_c \cdot 3600}{l_{obj} + d_{min}} \right) \cdot RR_{emp} \cdot (1 - P_{mech_fail}) \quad (11)$$

де l_{obj} – середня довжина маркованого об'єкта вздовж осі конвеєра, P_{mech_fail} – імовірність апаратної відмови сортувального механізму.

При фіксованих параметрах імітаційної моделі $l_{obj} = 0.4$ м та $d_{min} = 0.6$ м віртуальний апаратно-програмний комплекс продемонстрував розрахункову стабільну пропускну здатність на рівні 10710 *UPH*. Частка алгоритмічних помилок сортування (*Mis-sort rate*) у серії імітаційних експериментів склала менше 0.08%, що доводить високу функціональну стійкість архітектури до граничних навантажень.

Висновки. Проведене дослідження формалізує та теоретично валідує комплексну апаратно-програмну архітектуру динамічної радіочастотної ідентифікації для високошвидкісних конвеєрних ліній сортування в інфраструктурі ритейл-складів. Вирішення фундаментальної проблеми

деградації пропускної здатності систем УВЧ-діапазону було підтверджено шляхом розробки високоточного цифрового двійника в середовищі *MATLAB Simulink*. Багатокритеріальне імітаційне моделювання довело, що імплементація просторово-часового рознесення антенних решіток у поєднанні з апаратною компенсацією фазових спотворень гарантує стабілізацію енергетичного потенціалу в умовах глибоких перевідбиттів. Запропонована гібридна модель антиколізії продемонструвала в симуляційному середовищі здатність ефективно нівелювати експоненційне зростання бітових помилок, забезпечивши розрахунковий показник надійності ідентифікації на рівні 99.2% при кінематичній швидкості конвеєра 3.0 м/с.

Теоретично обґрунтовано та підтверджено методами імітаційного моделювання, що визначальним фактором забезпечення детермінованої роботи сортувальної автоматики є розгортання розподіленого програмного забезпечення на базі парадигми периферійних обчислень (*Edge Computing*). Моделювання топології мережевої взаємодії довело, що локальне *In-Memory* кешування та просторово-часова дедуплікація даних ізолюють виконавчі механізми конвеєра від транзакційних затримок центрального ядра *WMS*, редукуючи загальний системний час відгуку до 42 мс.

Розрахункова пропускна здатність віртуального комплексу досягла 10710 оброблених товарних одиниць за годину із часткою алгоритмічних помилок сортування менше 0.08%. Отримані результати глибокого математичного та стохастичного моделювання формують надійне наукове підґрунтя для подальшого фізичного прототипування та промислового масштабування розробленої архітектури в екосистемах сучасних дистриб'юторських центрів.

ЛІТЕРАТУРА/ REFERENCES

1. Abdo K. W. Radio Frequency Identification (RFID) implementation in an IoT Smart Library. *Journal of Information Systems Engineering and Management*. 2024. Vol. 9, № 3. С. 28480. <https://doi.org/10.29333/jisem/14925>
2. Acube Infotech. Guide to Implementing RFID in Retail Inventory Management. Acube Infotech. URL: <https://acubeinfotech.sa/blogs/guide-to-implementing-rfid-in-retail-inventory-management/> (дата звернення: 11.03.2026).
3. GeeksforGeeks. Introduction of Radio Frequency Identification (RFID). GeeksforGeeks. URL: <https://www.geeksforgeeks.org/computer-networks/introduction-of-radio-frequency-identification-rfid/> (дата звернення: 11.03.2026).

4. Gomes H., Navio F., Gaspar P. D., Soares V. N. G. J., Caldeira J. M. L. P. Radio-Frequency Identification Traceability System Implementation in the Packaging Section of an Industrial Company. *Applied Sciences*. 2023. Vol. 13, № 23. C. 12943. <https://doi.org/10.3390/app132312943>
5. Guerrero Gonzalez A., Pedreño Roca M. J., Ayala Bernal P. J. Study of RFID technology for Warehouse Traceability in the Company FRUMECAR. *Preprints*. 2024. <https://doi.org/10.20944/preprints202401.2101.v1>
6. Lim M. K., Bahr W., Leung S. C. H. RFID in the warehouse: A literature analysis (1995–2010) of its applications, benefits, challenges and future trends. *International Journal of Production Economics*. 2013. Vol. 145, № 1. C. 409–430. <https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2013.05.006>
7. Liu J. RFID (Radio Frequency Identification) Localization and Application. *Applied Sciences*. 2024. Vol. 14, № 13. C. 5932. <https://doi.org/10.3390/app14135932>
8. Sooksakun N., Sudsertsin S. The application of RFID in warehouse process: case study of consumer product manufacturer in Thailand. *LogForum*. 2014. Vol. 10, № 4. C. 423–431. <https://doi.org/10.17270/J.LOG.2014.4.7>
9. Turcu C. Development and implementation of RFID technology. *SciSpace*. 2009. <https://doi.org/10.5772/103>
10. Universidad Carlos III de Madrid. RFID Research Document. e-Archivo. <https://doi.org/10.20868/UPM.thesis.77254>

Received 14.03.2026.

Accepted 17.04.2026.

Published 30.04.2026

UDC 004.942:621.396.67:658.78

Vladyslav Sementsov, Vitaliy Tsapar

IMPLEMENTATION OF RFID TECHNOLOGY FOR OBJECT IDENTIFICATION IN RETAIL: OPTIMIZATION OF AUTOMATED SORTING LINES

Abstract. *The problem of integrating UHF radio frequency identification systems into the hardware and software complexes of high-speed conveyor lines in retail warehouses is investigated. Architectural solutions to minimize the impact of multipath radio wave propagation and Doppler frequency shift on the probability of reading passive tags in dynamics are theoretically substantiated. The validation of the proposed hybrid mathematical model of collision processing, combining deterministic prefix tree segmentation (Query Tree) with the stochastic DFSA algorithm of the EPCglobal Gen2 standard, was carried out by developing a comprehensive digital twin in the MATLAB Simulink environment. Simulation modeling proved the architecture's ability to achieve an estimated identification reliability rate of 99.2% at a linear conveyor speed of 3.0 m/s. The architecture of distributed middleware based on the Edge Computing paradigm was virtualized for spatiotemporal filtration of raw radio frequency data and local caching of routing tables. Stochastic simulation results confirm that translating aggregated arrays into the Application Level Events format with subsequent asynchronous transmission via EPCIS interfaces to the Warehouse Management System reduces system latency to 42 ms.*

The overall estimated throughput of the optimized complex in the simulation environment is 10710 processed units per hour with an algorithmic mis-sort rate of less than 0.08%.

Keywords: *RFID, automated sorting line, digital twin, simulation modeling, MATLAB Simulink, anti-collision algorithms, Edge Computing, WMS.*

Семенцов Владислав Костянтинович – аспірант, Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»
ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4402-8219>

Цапар Віталій Степанович – к.т.н., доцент, Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8347-7941>

Sementsov Vladyslav Kostyantynovych – Postgraduate Student, National Technical University of Ukraine “Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute”
ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4402-8219>

Tsapar Vitaliy Stepanovych – Ph.D., Associate Professor, National Technical University of Ukraine “Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute”
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8347-7941>