

Міністерство освіти і науки України

Луцький національний технічний університет

(повне найменування закладу вищої освіти)

Факультет комп'ютерних та інформаційних технологій

(повне найменування факультету)

Кафедра комп'ютерної інженерії та охоронних систем

(повне найменування кафедри)

**КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА
ЗА СТУПЕНЕМ ВИЩОЇ ОСВІТИ «БАКАЛАВР»**

**ПРОГРАМНО-АПАРАТНИЙ КОМПЛЕКС ДЛЯ
ІНВЕНТАРИЗАЦІЇ З ВИКОРИСТАННЯМ RFID-МІТОК**

**HARDWARE AND SOFTWARE COMPLEX FOR INVENTORY
USING RFID TAGS**

спеціальність 123 Комп'ютерна інженерія

(шифр і назва спеціальності)

освітня програма Комп'ютерна інженерія

(назва освітньої програми)

Виконав: здобувач вищої освіти
групи КІз-41

Бондаренко Васи́лина Васи́лівна

(підпис)

Керівник:

к.т.н., доцент

Костючко Сергій Миколайович

(підпис)

Кваліфікаційну роботу

допущено до захисту

« _____ » червня 2026 р.

Гарант освітньої програми:

к.т.н., доцент

Лавренчук Світлана Васи́лівна

(підпис)

Луцьк – 2026 року

ЛУЦЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

Факультет комп'ютерних та інформаційних технологій

Кафедра комп'ютерної інженерії та безпеки

Ступінь вищої освіти: бакалавр

Галузь знань: 12 Інформаційні технології

Спеціальність: 123 Комп'ютерна інженерія

Освітня програма: «Комп'ютерна інженерія»

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри

к.т.н. Т. Терлецький

« _____ » _____ 2025 р.

ЗАВДАННЯ

НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ ЗДОБУВАЧУ ВИЩОЇ ОСВІТИ

Бондаренко Васи́ліні Васи́лівні

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема кваліфікаційної роботи Програмно-апаратний комплекс для інвентаризації з використанням RFID-міток

Керівник роботи к.т.н., доц. Костючко Сергій Миколайович

затверджені наказом закладу вищої освіти від «20» грудня 2025 року № 536/01-02

2. Строк подання здобувачем вищої освіти кваліфікаційної роботи 28.05.2026 р.

3. Вихідні дані до роботи Джерелом розробки є науково-технічна література та публікації в періодичних виданнях з даного питання, опубліковані зарубіжні та вітчизняні роботи в даній області, різні інтернет-ресурси технічного спрямування

4. Зміст пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити):

Вступ

Аналітична частина

Програмно-апаратні рішення для побудови rfid-комплексу

Розробка програмно-апаратного комплексу для інвентаризації

Висновки

5. Перелік графічного (ілюстративного) матеріалу:

Структурна схема програмно-апаратного комплексу

Схема взаємодії апаратних компонентів RFID-комплексу

Блок схема алгоритму

Структура програмного інтерфейсу RFID-комплексу

АНОТАЦІЯ

Бондаренко В. В. Програмно-апаратний комплекс для інвентаризації з використанням RFID-міток. Рукопис.

Кваліфікаційна робота бакалавра ОП «Комп'ютерна інженерія» спеціальності 123 Комп'ютерна інженерія. Луцький національний технічний університет. Луцьк, 2026.

Кваліфікаційна робота складається з вступу, трьох розділів, висновків, списку використаних джерел, додатків.

У першому розділі здійснено аналіз проблеми інвентаризації матеріальних об'єктів, розглянуто сучасні технології автоматичної ідентифікації, принцип роботи RFID-технології, існуючі RFID-рішення та вимоги до програмно-апаратного комплексу.

У другому розділі проведено обґрунтування архітектури RFID-комплексу, вибір RFID-зчитувача, RFID-міток, мікроконтролерної платформи, бази даних, програмної архітектури та засобів інформаційної безпеки.

У третьому розділі розроблено структурну схему комплексу, реалізовано апаратну частину, алгоритм роботи, базу даних, програмний інтерфейс користувача та виконано тестування ефективності розробленого рішення.

Об'єкт дослідження – процес автоматизованої інвентаризації матеріальних об'єктів із використанням засобів радіочастотної ідентифікації.

Предмет дослідження – програмно-апаратні засоби побудови системи інвентаризації на основі RFID-міток, RFID-зчитувача, мікроконтролерної платформи, бази даних та інтерфейсу користувача.

Метою роботи є розробка програмно-апаратного комплексу для автоматизованої інвентаризації об'єктів з використанням RFID-міток.

Ключові слова: RFID, RFID-мітка, RFID-зчитувач, інвентаризація, програмно-апаратний комплекс, ESP32, база даних, автоматична ідентифікація, інтерфейс користувача.

ABSTRACT

Bondarenko V. Hardware and software complex for inventory using RFID tags. Manuscript.

Qualification work of the bachelor of the specialty "Computer Engineering" specialty 123 Computer Engineering. Lutsk National Technical University. Lutsk, 2026.

The qualification work consists of an introduction, three chapters, conclusions, a list of sources used, and appendices.

The first chapter analyzes the problem of inventorying material objects, considers modern technologies of automatic identification, the principle of operation of RFID technology, existing RFID solutions and requirements for the software and hardware complex.

The second chapter provides a justification for the architecture of the RFID complex, the choice of an RFID reader, RFID tags, microcontroller platform, database, software architecture and information security tools.

In the third chapter, a structural diagram of the complex is developed, the hardware part, the algorithm of operation, database, user interface are implemented and the effectiveness of the developed solution is tested.

The object of the study is the process of automated inventory of material objects using radio frequency identification.

The subject of the study is software and hardware for building an inventory system based on RFID tags, RFID reader, microcontroller platform, database and user interface.

The aim of the work is to develop a software and hardware complex for automated inventory of objects using RFID tags.

Keywords: RFID, RFID tag, RFID reader, inventory, software and hardware complex, ESP32, database, automatic identification, user interface.

ЗМІСТ

ВСТУП.....	7
РОЗДІЛ 1 АНАЛІТИЧНА ЧАСТИНА.....	10
1.1. Аналіз проблеми інвентаризації матеріальних об'єктів.....	10
1.2. Огляд сучасних технологій автоматичної ідентифікації	12
1.3. Принцип роботи RFID-технології.....	17
1.4. Аналіз існуючих RFID-рішень для інвентаризації	18
1.5. Формування вимог до програмно-апаратного комплексу.....	21
РОЗДІЛ 2 ПРОГРАМНО-АПАРАТНІ РІШЕННЯ ДЛЯ ПОБУДОВИ RFID-КОМПЛЕКСУ	24
2.1. Обґрунтування архітектури програмно-апаратного комплексу.....	24
2.2. Вибір RFID-зчитувача та RFID-міток.....	26
2.3. Вибір мікроконтролерної платформи	28
2.4. Проектування програмної архітектури системи	30
2.5. Вибір бази даних та способу збереження інвентаризаційних записів.....	33
2.6. Забезпечення інформаційної безпеки RFID-системи	35
РОЗДІЛ 3 РОЗРОБКА ПРОГРАМНО-АПАРАТНОГО КОМПЛЕКСУ ДЛЯ ІНВЕНТАРИЗАЦІЇ.....	38
3.1. Розробка структурної схеми комплексу	38
3.2. Реалізація апаратної частини системи.....	41
3.3. Розробка алгоритму роботи RFID-комплексу.....	44
3.4. Проектування бази даних інвентаризації.....	48
3.5. Розробка програмного інтерфейсу користувача	52
3.6. Тестування та оцінка ефективності розробленого рішення.....	57
ВИСНОВКИ.....	62
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	67

ВСТУП

У сучасних умовах ефективно управління матеріальними ресурсами, обладнанням, технічними засобами, складськими запасами та іншими об'єктами обліку є важливою складовою організації роботи підприємств, установ, навчальних закладів і виробничих структур. Інвентаризація дає змогу контролювати наявність майна, його місцезнаходження, технічний стан, відповідальних осіб і зміни, пов'язані з переміщенням або використанням об'єктів. Проте традиційні способи інвентаризації, що базуються на ручному внесенні даних, паперових журналах, таблицях або візуальній перевірці інвентарних номерів, мають низку суттєвих недоліків. До них належать значні витрати часу, ймовірність помилок, залежність від людського фактора, складність швидкого пошуку об'єктів і несвоєчасне оновлення інформації.

Одним із перспективних напрямів розв'язання зазначених проблем є використання технології радіочастотної ідентифікації RFID. Її застосування дає змогу автоматизувати процес розпізнавання об'єктів за допомогою спеціальних RFID-міток і зчитувачів, що значно спрощує процедуру обліку. На відміну від традиційного ручного введення даних або використання звичайних маркувальних етикеток, RFID-технологія забезпечує швидке отримання унікального ідентифікатора об'єкта, передавання інформації до програмної системи та її подальше збереження у базі даних. Це створює передумови для підвищення точності, оперативності та прозорості інвентаризаційних процесів.

Актуальність теми також зумовлена активним розвитком програмно-апаратних рішень, у яких RFID поєднується з мікроконтролерами, базами даних, локальними або хмарними сервісами, вебінтерфейсами та засобами аналітики. У сучасних дослідженнях RFID розглядається не лише як окрема технологія автоматичної ідентифікації, а як складова комплексних систем інтелектуального обліку, складської логістики, управління активами та інтеграції з IoT-рішеннями. Опрацьована література підтверджує, що

RFID-системи активно використовуються для підвищення точності інвентаризації, оптимізації складських процесів, зменшення кількості помилок і забезпечення обліку об'єктів у режимі, наближеному до реального часу

У зв'язку з цим розробка програмно-апаратного комплексу для інвентаризації з використанням RFID-міток є актуальним завданням. Такий комплекс може бути використаний як демонстраційна, навчальна або прикладна система для автоматизованого обліку матеріальних об'єктів. Його впровадження дає змогу скоротити час проведення інвентаризації, підвищити достовірність облікових даних, спростити пошук об'єктів і забезпечити електронне збереження інформації про їхній стан та місцезнаходження.

Метою кваліфікаційної роботи є розробка програмно-апаратного комплексу для автоматизованої інвентаризації об'єктів з використанням RFID-міток, що забезпечує зчитування унікальних ідентифікаторів, обробку отриманих даних, їх збереження в базі даних та відображення інформації користувачу через програмний інтерфейс.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити такі завдання:

- проаналізувати сучасні підходи до організації інвентаризації матеріальних об'єктів;
- розглянути особливості використання RFID-технології в системах автоматизованого обліку;
- дослідити існуючі програмно-апаратні рішення для інвентаризації з використанням RFID-міток;
- визначити основні вимоги до програмно-апаратного комплексу інвентаризації;
- обґрунтувати вибір апаратних компонентів системи, зокрема RFID-зчитувача, RFID-міток і мікроконтролерної платформи;
- спроектувати загальну архітектуру програмно-апаратного комплексу;
- розробити алгоритм роботи системи зчитування та обробки RFID-ідентифікаторів;

- спроектувати структуру бази даних для збереження інформації про об'єкти інвентаризації;
- реалізувати програмний інтерфейс для роботи з інвентаризаційними записами;
- виконати тестування розробленого комплексу та оцінити ефективність його роботи.

Об'єктом дослідження є процес автоматизованої інвентаризації матеріальних об'єктів із використанням засобів радіочастотної ідентифікації.

Предметом дослідження є програмно-апаратні засоби побудови системи інвентаризації на основі RFID-міток, RFID-зчитувача, мікроконтролерної платформи, бази даних та програмного інтерфейсу користувача.

Практичне значення одержаних результатів полягає у можливості використання розробленого програмно-апаратного комплексу для автоматизації процесів обліку та інвентаризації матеріальних об'єктів. Запропоноване рішення може бути застосоване в навчальних лабораторіях, офісах, невеликих складських приміщеннях, майстернях або інших структурних підрозділах, де необхідно здійснювати облік обладнання, технічних засобів чи інших інвентарних одиниць. Використання RFID-міток дає змогу зменшити вплив людського фактора, прискорити процедуру перевірки наявності об'єктів, забезпечити електронне збереження даних і спростити формування звітної інформації.

Розроблений комплекс може бути використаний як основа для подальшого удосконалення системи, зокрема шляхом інтеграції з хмарними сервісами, мобільним застосунком, вебінтерфейсом, засобами аналітики або корпоративними системами обліку. Крім того, результати роботи можуть бути корисними для навчальних цілей під час вивчення мікроконтролерних систем, RFID-технологій, баз даних, IoT-рішень і принципів побудови програмно-апаратних комплексів.

РОЗДІЛ 1

АНАЛІТИЧНА ЧАСТИНА

1.1 Аналіз проблеми інвентаризації матеріальних об'єктів

Інвентаризація матеріальних об'єктів є важливою складовою управління майном, обладнанням, складськими запасами, технічними засобами та іншими ресурсами організації. Її основне призначення полягає у встановленні фактичної наявності об'єктів, перевірці їх відповідності обліковим даним, визначенні місця розташування, технічного стану та відповідальних осіб. У сучасних умовах, коли кількість матеріальних активів у підприємствах, навчальних закладах, лабораторіях, офісах і складських приміщеннях постійно зростає, традиційні способи інвентаризації дедалі частіше виявляються недостатньо ефективними. Як зазначається у сучасних дослідженнях цифрової трансформації ланцюгів постачання, ефективність управління запасами значною мірою залежить від точності, своєчасності та доступності облікової інформації [1].

Традиційна інвентаризація здебільшого передбачає ручну перевірку об'єктів, звірення інвентарних номерів, заповнення паперових документів або внесення даних до електронних таблиць. Такий підхід є відносно простим, однак він має низку суттєвих недоліків. Насамперед, ручне введення інформації потребує значних витрат часу, особливо у випадках, коли необхідно перевірити велику кількість об'єктів. Крім того, процес залежить від уважності працівника, що підвищує ризик помилок під час запису інвентарного номера, назви об'єкта, місця його зберігання або відповідальної особи. У результаті можуть виникати розбіжності між фактичною наявністю майна та даними, що містяться в обліковій системі.

Ще однією проблемою традиційної інвентаризації є складність оперативного оновлення інформації. Якщо об'єкт переміщується між кабінетами, складами, лабораторіями або передається іншій відповідальній

особі, такі зміни не завжди своєчасно фіксуються в облікових документах. Це призводить до втрати актуальності даних і ускладнює пошук потрібного об'єкта. У наукових оглядах, присвячених оптимізації інвентаризаційних систем, підкреслюється, що однією з головних переваг RFID-рішень є можливість підвищення точності обліку та зменшення впливу людського фактора під час ідентифікації об'єктів [2].

Окрему проблему становить обмежена швидкість перевірки об'єктів за допомогою звичайних інвентарних номерів, штрихкодів або QR-кодів. Такі засоби ідентифікації потребують безпосереднього візуального доступу до маркування, а у разі пошкодження етикетки, забруднення поверхні або незручного розміщення об'єкта процес зчитування ускладнюється. У складських і лабораторних умовах це може призводити до додаткових затримок, оскільки працівник змушений вручну знаходити маркування, перевіряти його читабельність і вводити або сканувати дані. У дослідженнях впливу RFID на управління запасами зазначається, що радіочастотна ідентифікація дає змогу автоматизувати процес розпізнавання об'єктів і зменшити залежність від прямого візуального контролю [3].

Недостатня автоматизація інвентаризації також впливає на якість управлінських рішень. Якщо інформація про об'єкти оновлюється із запізненням або містить помилки, керівництво організації не може швидко отримати достовірні дані про фактичну наявність майна, його розташування чи стан. Це ускладнює планування закупівель, списання застарілого обладнання, контроль за використанням ресурсів і підготовку звітності. Особливо актуальною ця проблема є для організацій, у яких постійно відбувається переміщення обладнання, видача матеріальних цінностей у користування, повернення об'єктів або оновлення складських залишків.

Використання RFID-технології дає змогу частково або повністю усунути зазначені недоліки. RFID-мітка містить унікальний ідентифікатор, який може бути зчитаний спеціальним RFID-зчитувачем і переданий до програмної

системи для подальшої обробки. На основі цього ідентифікатора система може автоматично знайти відповідний запис у базі даних, відобразити інформацію про об'єкт, зафіксувати дату й час зчитування, а також оновити журнал інвентаризаційних подій. У працях, присвячених оптимізації управління запасами за допомогою RFID, наголошується, що така технологія сприяє підвищенню оперативності обліку, зменшенню кількості помилок і покращенню контролю за рухом матеріальних об'єктів [4].

1.2 Огляд сучасних технологій автоматичної ідентифікації

Автоматична ідентифікація об'єктів є важливою складовою сучасних систем обліку, інвентаризації, логістики, складського управління та контролю руху матеріальних цінностей. Її основне призначення полягає у швидкому розпізнаванні об'єкта без необхідності ручного введення всієї інформації про нього. У межах інвентаризаційних процесів автоматична ідентифікація дає змогу пов'язати фізичний об'єкт із його електронним записом у базі даних, що значно спрощує перевірку наявності, пошук, переміщення та облік майна. У дослідженнях, присвячених застосуванню RFID для покращення управління інвентаризацією, підкреслюється, що використання автоматизованих засобів ідентифікації є одним із ключових напрямів підвищення точності та швидкості облікових операцій [5].

До найпоширеніших технологій автоматичної ідентифікації належать штрихкоди, QR-коди, NFC та RFID. Кожна з цих технологій має власні особливості, переваги, обмеження та сферу доцільного використання. Їх застосування залежить від вимог до швидкості зчитування, вартості впровадження, умов експлуатації, відстані між зчитувачем і міткою, обсягу даних, які потрібно зберігати, а також від необхідності інтеграції з програмними системами обліку.

Однією з найстаріших і найпоширеніших технологій ідентифікації є штрихкод. Він являє собою графічне зображення у вигляді послідовності чорних і білих смуг, що кодують певний числовий або символічний ідентифікатор. Основною перевагою штрихкодів є низька вартість створення та простота використання. Для їх нанесення достатньо звичайного друку, а для зчитування використовуються спеціальні сканери або камери. Саме тому штрихкоди широко застосовуються у торгівлі, логістиці, бібліотечних системах, складському обліку та маркуванні продукції.

Проте штрихкоди мають низку обмежень, які знижують їх ефективність у складних інвентаризаційних процесах. Насамперед вони потребують прямої видимості між сканером і маркуванням. Якщо етикетка пошкоджена, забруднена, закрита іншими предметами або розміщена у важкодоступному місці, її зчитування ускладнюється або стає неможливим. Крім того, штрихкод зазвичай містить обмежений обсяг інформації та не забезпечує автоматичного зчитування кількох об'єктів одночасно. Для кожного об'єкта необхідно окремо навести сканер на маркування, що збільшує час проведення інвентаризації.

Більш сучасним різновидом графічного кодування є QR-код. На відміну від класичного штрихкоду, QR-код має двовимірну структуру і може містити значно більший обсяг інформації. У ньому можна закодувати текстові дані, посилання, інвентарний номер, короткий опис об'єкта або інші службові відомості. QR-коди зручно використовувати у випадках, коли необхідно швидко перейти до електронної картки об'єкта, інструкції, технічної документації або вебсторінки системи обліку. Їх можна зчитувати за допомогою смартфонів, планшетів або спеціальних сканерів, що робить цю технологію доступною і простою для впровадження.

Водночас QR-коди, як і штрихкоди, залишаються оптичними засобами ідентифікації. Це означає, що для їх зчитування також потрібна пряма видимість. Код має бути достатньо чистим, неушкодженим і розміщеним так, щоб камера могла його розпізнати. У разі великої кількості об'єктів або

необхідності швидкої перевірки декількох одиниць майна QR-коди поступаються RFID, оскільки процес зчитування все одно потребує участі працівника і послідовного сканування кожної позначки.

Ще однією технологією автоматичної ідентифікації є NFC. Вона є різновидом радіочастотної комунікації ближнього радіуса дії та використовується для обміну даними на дуже короткій відстані. NFC часто застосовується у банківських картках, електронних пропусках, студентських квитках, системах контролю доступу, мобільних платежах і персональній ідентифікації. Основною перевагою NFC є зручність використання, оскільки для зчитування достатньо піднести картку або смартфон до відповідного пристрою.

Однак для задач інвентаризації NFC має обмежену сферу застосування. Через дуже малу відстань зчитування ця технологія більше підходить для персональної ідентифікації користувачів або контролю доступу, ніж для масового обліку матеріальних об'єктів. Якщо потрібно перевірити десятки або сотні одиниць обладнання, NFC не дає суттєвої переваги над QR-кодами, оскільки кожну мітку все одно потрібно зчитувати окремо і з дуже близької відстані.

Найбільш перспективною технологією для автоматизованої інвентаризації є RFID. Радіочастотна ідентифікація передбачає використання RFID-міток і RFID-зчитувачів, які обмінюються даними за допомогою радіосигналу. На відміну від штрихкодів і QR-кодів, RFID не завжди потребує прямої видимості між міткою та зчитувачем. Це дає змогу розміщувати мітки всередині корпусів, на зворотному боці об'єктів, у контейнерах або на предметах, які складно швидко оглянути візуально. У літературному огляді з питань впровадження RFID зазначається, що саме можливість безконтактної ідентифікації є однією з головних причин активного використання цієї технології в системах обліку, логістики та управління активами [6].

RFID-мітка може містити унікальний ідентифікатор, який зчитується пристроєм і передається до програмної системи. Далі цей ідентифікатор використовується для пошуку відповідного запису у базі даних. Таким чином, фізичний об'єкт пов'язується з електронною інформаційною картою, де можуть зберігатися його назва, інвентарний номер, категорія, місце розташування, відповідальна особа, дата додавання, стан та історія переміщень. У системах складської трасованості RFID використовується не лише для фіксації наявності об'єктів, а й для контролю їхнього руху, перевірки розміщення та підвищення прозорості логістичних операцій [7].

Суттєвою перевагою RFID є можливість швидкого зчитування інформації. У складніших системах, особливо з використанням UHF RFID, зчитувач може ідентифікувати кілька міток протягом короткого проміжку часу. Це особливо важливо для складів, бібліотек, лабораторій, магазинів, архівів і виробничих приміщень, де потрібно регулярно перевіряти велику кількість об'єктів. Для кваліфікаційної роботи, орієнтованої на створення програмно-апаратного комплексу, доцільним є використання доступнішого варіанта RFID-рішення, наприклад HF RFID-модуля, який дає змогу продемонструвати основний принцип роботи системи інвентаризації.

У сучасних складських рішеннях RFID розглядається як одна з базових технологій цифровізації обліку. Вона забезпечує автоматизоване зчитування міток, зменшення кількості ручних операцій, пришвидшення перевірки запасів і покращення контролю за розміщенням об'єктів. Дослідження RFID-технологій у складському середовищі показують, що їх використання сприяє переходу від традиційного ручного обліку до більш автоматизованих систем, які можуть інтегруватися з програмним забезпеченням управління запасами, базами даних та іншими інформаційними системами [8].

Для наочного порівняння основних технологій автоматичної ідентифікації доцільно подати їхні переваги, недоліки та можливості використання у процесах інвентаризації. (таблиця 1.1)

Таблиця 1.1 – Порівняння сучасних технологій автоматичної ідентифікації об'єктів

Технологія	Основний принцип роботи	Переваги	Недоліки	Доцільність для інвентаризації
Штрихкод	Зчитування оптичного коду у вигляді смуг	Низька вартість, простота друку, поширеність	Потрібна пряма видимість, етикетка може пошкоджуватися	Доцільний для простого обліку невеликої кількості об'єктів
QR-код	Зчитування двовимірного графічного коду камерою або сканером	Містить більше даних, може зчитуватися смартфоном	Потрібна пряма видимість коду, залежність від якості друку	Доцільний для доступу до електронної картки об'єкта
NFC	Ближній радіочастотний обмін даними	Зручність, безконтактність, підтримка смартфонами	Дуже мала відстань зчитування	Доцільний для персональної ідентифікації та контролю доступу
RFID	Радіочастотне зчитування унікального ідентифікатора мітки	Безконтактність, швидкість, не завжди потрібна пряма видимість, інтеграція з базою даних	Вища вартість компонентів, вплив металу та середовища, потреба у налаштуванні системи	Найбільш доцільний варіант для автоматизованої інвентаризації

Як видно з таблиці 1.1, RFID має низку переваг порівняно з оптичними засобами маркування. Найважливішими з них є безконтактне зчитування, можливість інтеграції з програмною системою, зменшення впливу людського фактора та придатність для побудови автоматизованого комплексу обліку. Водночас RFID не є універсальним рішенням для всіх випадків, оскільки потребує вибору відповідних міток, зчитувачів, частотного діапазону, способу передавання даних і програмного забезпечення.

1.3 Принцип роботи RFID-технології

RFID – це технологія радіочастотної ідентифікації, яка використовується для автоматичного розпізнавання об'єктів за допомогою спеціальних міток і зчитувачів. На відміну від штрихкодів або QR-кодів, RFID не завжди потребує прямої видимості між міткою та пристроєм зчитування, оскільки обмін даними відбувається за допомогою радіосигналу. Саме ця особливість робить RFID зручною для інвентаризації обладнання, товарів, матеріальних цінностей, складських запасів та інших об'єктів обліку [9].

Типова RFID-система складається з кількох основних елементів: RFID-мітки, RFID-зчитувача, антени, пристрою обробки даних і програмного забезпечення. RFID-мітка закріплюється на об'єкті інвентаризації та містить унікальний ідентифікатор. Зчитувач формує радіочастотне поле, активує мітку та приймає від неї дані. Після цього отриманий код передається до програмної частини системи, де виконується пошук відповідного запису в базі даних.

У спрощеному вигляді принцип роботи RFID-технології можна подати так: спочатку зчитувач надсилає радіосигнал, потім RFID-мітка відповідає передаванням свого унікального коду, після чого система обробляє отримані дані та зіставляє їх з інформацією про об'єкт. Якщо RFID-код уже є у базі даних, користувач бачить відомості про відповідний об'єкт: назву, інвентарний номер, категорію, місце розташування, відповідальну особу або поточний статус. Якщо код відсутній, система може запропонувати додати новий об'єкт до бази.

RFID-мітки можуть бути пасивними, активними або напівпасивними. Пасивні мітки не мають власного джерела живлення і працюють за рахунок енергії, яку отримують від поля зчитувача. Вони дешевші, компактніші та найчастіше використовуються в системах обліку й інвентаризації. Активні мітки мають власне джерело живлення, тому можуть працювати на більшій відстані, але є дорогими. Напівпасивні мітки поєднують окремі властивості обох підходів.

Залежно від частотного діапазону RFID-системи поділяють на LF, HF та UHF. LF-системи працюють на низьких частотах і мають невелику дальність зчитування. HF-системи, зокрема рішення на частоті 13,56 MHz, часто використовуються в картках доступу, бібліотечних системах, навчальних і лабораторних проєктах. UHF RFID застосовується у складській логістиці, торгівлі та промисловості, оскільки забезпечує більшу дальність зчитування і може використовуватися для швидкої перевірки значної кількості об'єктів.

У межах цієї кваліфікаційної роботи доцільно орієнтуватися на побудову програмно-апаратного комплексу з використанням доступного RFID-зчитувача, RFID-міток, мікроконтролерної платформи та бази даних. Такий підхід дає змогу реалізувати основні функції системи інвентаризації: зчитування RFID-коду, передавання даних до програмного модуля, пошук об'єкта в базі, відображення інформації користувачу та фіксацію події зчитування.

Важливою перевагою RFID є можливість інтеграції з іншими інформаційними технологіями. У сучасних системах RFID може поєднуватися з IoT-пристроями, хмарними платформами, базами даних, вебінтерфейсами та аналітичними модулями. Це дає змогу не лише автоматизувати процес зчитування міток, а й створити повноцінну систему управління інвентаризаційними даними [10]. Надана добірка джерел також підтверджує, що інтеграція RFID з програмними платформами є одним із ключових напрямів розвитку сучасних систем обліку

1.4 Аналіз існуючих RFID-рішень для інвентаризації

Аналіз сучасних RFID-рішень показує, що ця технологія активно використовується для автоматизації інвентаризації, складського обліку, контролю переміщення об'єктів і підвищення точності управління матеріальними ресурсами. У сучасних роботах RFID розглядається не лише як засіб зчитування унікального ідентифікатора, а як частина комплексної

інформаційної системи, що може поєднувати апаратні модулі, програмне забезпечення, бази даних, хмарні сервіси та IoT-платформи. Зокрема, у дослідженнях інвентаризації в реальному часі наголошується, що поєднання RFID з IoT та хмарними платформами дає змогу створювати масштабовані системи обліку, у яких дані про об'єкти можуть оновлюватися оперативнo та бути доступними для подальшого аналізу [11].

Одним із важливих напрямів розвитку RFID-систем є інтеграція з архітектурою IoT. У таких рішеннях RFID-зчитувач виконує функцію первинного джерела даних, а мікроконтролер або мережевий модуль забезпечує передавання інформації до серверної частини або хмарного середовища. Це дає змогу не лише фіксувати факт наявності об'єкта, а й організувати журнал подій, контролювати переміщення, оновлювати статуси та формувати звіти. У роботах, присвячених безпечній RFID-IoT архітектурі для інтелектуального управління інвентаризацією, окрема увага приділяється питанням захисту даних, автентифікації користувачів і контролю доступу до інформаційної системи [12].

Окрему групу становлять RFID-рішення, інтегровані з ERP-системами та корпоративними платформами управління. Такі підходи є актуальними для підприємств, де інвентаризація пов'язана не лише з фізичною перевіркою об'єктів, а й з бухгалтерським обліком, закупівлями, логістикою, управлінням запасами та звітністю. У систематичних оглядах впровадження ERP і RFID підкреслюється, що найбільший ефект досягається тоді, коли RFID-ідентифікація не працює ізольовано, а є частиною єдиного інформаційного середовища організації [13].

Практика використання RFID у галузевих рішеннях також підтверджує її ефективність. Наприклад, у фармацевтичних ланцюгах постачання RFID застосовується для підвищення прозорості руху продукції, контролю справжності товарів, зменшення ризику втрат і покращення конкурентних переваг підприємств. Такі приклади важливі для цієї кваліфікаційної роботи,

оскільки вони показують, що RFID може використовуватися не лише для простого обліку, а й для підвищення надійності, контрольованості та простежуваності матеріальних потоків [14].

У наукових роботах також розглядаються комбіновані рішення, де RFID поєднується з бездротовими сенсорними мережами. Такий підхід дає змогу створювати інтелектуальні системи управління активами, у яких RFID відповідає за ідентифікацію об'єктів, а сенсорні вузли – за передавання додаткових даних або організацію мережевої взаємодії. Це свідчить про можливість подальшого розширення функціональності розроблюваного комплексу, наприклад шляхом додавання бездротового передавання даних або моніторингу умов зберігання об'єктів [15].

Для складської логістики характерними є рішення, у яких RFID використовується для контролю розміщення, переміщення та обліку товарів. У таких системах основна увага приділяється підвищенню точності інвентаризації, скороченню часу перевірки та зменшенню кількості ручних операцій. Дослідження застосування нових RFID-систем у складському управлінні показує, що автоматизація зчитування міток може сприяти кращому використанню складського простору та підвищенню ефективності логістичних процесів [16].

Водночас для кваліфікаційної роботи особливо важливими є не лише промислові системи, а й доступні прототипи, які можна реалізувати на базі мікроконтролерів. У дослідженнях RFID-систем інвентаризації та безпеки описуються рішення, де RFID-зчитувач поєднується з Arduino, а програмна частина забезпечує реєстрацію, обробку та відображення даних. Такі роботи підтверджують, що навіть відносно проста апаратна база може бути використана для створення функціонального комплексу обліку об'єктів [17].

Ще одним практичним напрямом є використання NodeMCU або ESP-модулів, які мають вбудовані засоби бездротового зв'язку. У хмарно підключених RFID-системах NodeMCU може виконувати роль проміжної ланки

між RFID-зчитувачем і віддаленою базою даних. Це дає змогу реалізувати облік об'єктів без постійного підключення до персонального комп'ютера та створити основу для IoT-орієнтованої системи інвентаризації [18].

1.5 Формування вимог до програмно-апаратного комплексу

На основі аналізу проблем традиційної інвентаризації, особливостей RFID-технології та існуючих рішень можна сформувати основні вимоги до програмно-апаратного комплексу. Розроблювана система має забезпечувати автоматизоване зчитування RFID-міток, обробку отриманих ідентифікаторів, збереження інформації про об'єкти в базі даних і надання користувачу зручного інтерфейсу для роботи з інвентаризаційними записами.

Основною функціональною вимогою є коректне зчитування унікального коду RFID-мітки. Кожна мітка має бути пов'язана з конкретним матеріальним об'єктом, наприклад обладнанням, інструментом, технічним засобом або інвентарною одиницею. Після зчитування система повинна автоматично визначати, чи зареєстрований цей код у базі даних, і відображати відповідну інформацію про об'єкт. Якщо RFID-код відсутній у базі, користувач має отримати можливість додати новий запис.

Наступною важливою вимогою є наявність електронної бази даних. Вона повинна зберігати основну інформацію про об'єкти інвентаризації: RFID-код, назву, інвентарний номер, категорію, місце розташування, відповідальну особу, статус і дату додавання. Крім того, доцільно передбачити журнал подій, у якому фіксуватимуться факти зчитування міток, зміни записів, переміщення об'єктів або оновлення їхнього статусу. Такий підхід відповідає сучасним принципам побудови RFID-систем управління інвентаризацією, де важливу роль відіграє не лише ідентифікація об'єкта, а й подальша обробка та збереження даних [19].

Програмна частина комплексу має забезпечувати виконання основних операцій з інвентаризаційними записами. До них належать додавання нового

об'єкта, редагування інформації, пошук за RFID-кодом або інвентарним номером, перегляд списку об'єктів, фіксація результатів зчитування та формування звітів. Інтерфейс користувача повинен бути простим і зрозумілим, оскільки система може використовуватися не лише технічними фахівцями, а й працівниками, відповідальними за облік майна.

До апаратної частини висуваються вимоги доступності, надійності та простоти інтеграції. Для навчального або демонстраційного прототипу доцільно використовувати недорогий RFID-зчитувач, пасивні RFID-мітки та мікроконтролерну платформу. Такий підхід дає змогу створити функціональний комплекс без надмірного ускладнення апаратної частини. Досвід створення недорогих лабораторних RFID-систем підтверджує, що навіть доступні апаратні компоненти можуть забезпечити достатній рівень автоматизації обліку для навчальних, офісних або лабораторних умов [20].

Окремо слід врахувати вимоги до передавання даних. Якщо система реалізується як локальний прототип, RFID-зчитувач може передавати дані до комп'ютера або мікроконтролера через послідовний інтерфейс. Якщо ж передбачається подальший розвиток комплексу як IoT-рішення, доцільним є використання модуля з підтримкою Wi-Fi, наприклад NodeMCU або ESP32. Це дає змогу передавати дані до віддаленої бази, хмарного сервісу або вебзастосунку. Подібні рішення описуються у практичних роботах, де поєднуються RFID, NodeMCU та програмні засоби обліку [21].

Також важливою є вимога до масштабованості. Розроблений комплекс має бути придатним для поступового розширення: збільшення кількості RFID-міток, додавання нових категорій об'єктів, підключення додаткових користувачів або перенесення бази даних із локального середовища до серверної чи хмарної інфраструктури. У перспективі система може бути доповнена мобільним застосунком, вебінтерфейсом, модулем аналітики або інтеграцією з іншими системами обліку.

Не менш важливими є вимоги до інформаційної безпеки. Оскільки система працює з даними про матеріальні об'єкти, відповідальних осіб і переміщення майна, необхідно передбачити обмеження доступу до функцій редагування, захист бази даних, резервне копіювання та журналювання дій користувачів. Для базового прототипу ці вимоги можуть бути реалізовані у спрощеному вигляді, але їх потрібно враховувати під час проектування архітектури системи. Узагальнені вимоги до програмно-апаратного комплексу подано в таблиці 1.2.

Таблиця 1.2 – Основні вимоги до програмно-апаратного комплексу інвентаризації

Група вимог	Зміст вимог
Функціональні вимоги	Зчитування RFID-міток, пошук об'єкта, додавання, редагування та перегляд записів
Вимоги до бази даних	Збереження RFID-коду, назви об'єкта, інвентарного номера, категорії, місця розташування, відповідальної особи та статусу
Вимоги до інтерфейсу	Простота використання, можливість пошуку, перегляду об'єктів і формування звітів
Апаратні вимоги	Використання RFID-зчитувача, RFID-міток і мікроконтролерної платформи
Вимоги до передавання даних	Передавання RFID-коду до програмної частини локально або через мережевий модуль
Вимоги до безпеки	Обмеження доступу, журналювання дій, захист і резервне копіювання даних
Вимоги до масштабованості	Можливість розширення кількості об'єктів, користувачів і програмних модулів

РОЗДІЛ 2

ПРОГРАМНО-АПАРАТНІ РІШЕННЯ ДЛЯ ПОБУДОВИ RFID-КОМПЛЕКСУ

2.1 Обґрунтування архітектури програмно-апаратного комплексу

Програмно-апаратний комплекс для інвентаризації з використанням RFID-міток доцільно будувати за модульним принципом. Це означає, що система має складатися з окремих взаємопов'язаних частин, кожна з яких виконує конкретну функцію: ідентифікацію об'єкта, передавання даних, обробку інформації, збереження записів і відображення результатів користувачу. Такий підхід спрощує розробку, тестування та подальше розширення комплексу.

Загальна архітектура системи (рис. 2.1) передбачає використання RFID-мітки, RFID-зчитувача, мікроконтролерної платформи, програмного модуля, бази даних та інтерфейсу користувача. RFID-мітка закріплюється на матеріальному об'єкті й містить унікальний ідентифікатор. Після піднесення мітки до зчитувача її код передається до мікроконтролера або безпосередньо до програмної частини. Далі система виконує пошук цього ідентифікатора в базі даних і відображає інформацію про відповідний об'єкт.

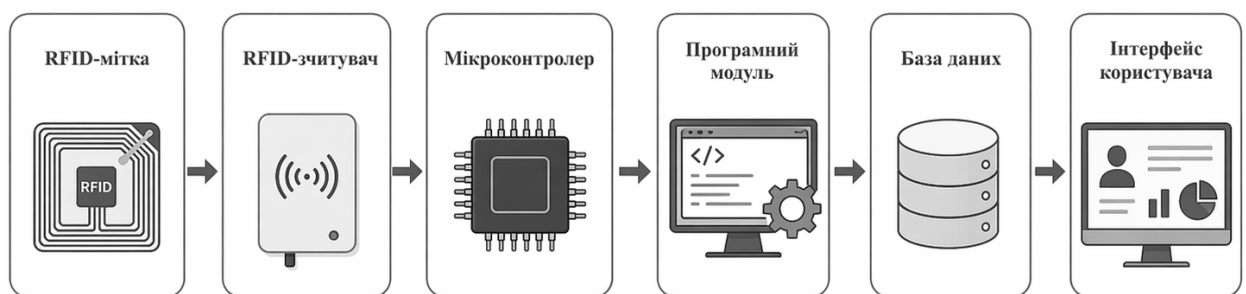


Рисунок 2.1 – Логіка роботи комплексу

Апаратна частина комплексу відповідає за фізичне зчитування RFID-міток. До неї належать RFID-зчитувач, RFID-мітки, мікроконтролер або модуль передавання даних. Для навчального або демонстраційного прототипу доцільно

використовувати доступні компоненти, наприклад RFID-модуль RC522, пасивні RFID-картки або брелоки та мікроконтролерну платформу Arduino, NodeMCU або ESP32. Такий варіант є достатнім для перевірки основного принципу роботи системи та реалізації базових функцій інвентаризації.

Програмна частина комплексу забезпечує обробку отриманого RFID-коду. Після зчитування ідентифікатора система має визначити, чи існує відповідний запис у базі даних. Якщо об'єкт уже зареєстрований, користувач бачить його назву, інвентарний номер, категорію, місце розташування, відповідальну особу та поточний статус. Якщо RFID-код не знайдено, система може запропонувати створити новий запис. Таким чином забезпечується зв'язок між фізичним об'єктом і його електронною картою.

База даних є центральним елементом програмної частини. Вона повинна зберігати інформацію про всі об'єкти інвентаризації, а також журнал подій, пов'язаних зі зчитуванням міток, оновленням записів або зміною статусу об'єктів. Наявність журналу подій дає змогу відстежувати історію роботи системи, що є важливим для контролю правильності інвентаризації.

Інтерфейс користувача має бути простим і зрозумілим. Він повинен надавати можливість переглядати список об'єктів, додавати нові записи, редагувати інформацію, виконувати пошук за RFID-кодом або інвентарним номером, а також формувати звіт про результати інвентаризації. Для поставлених завдань доцільним є створення локального програмного інтерфейсу або простого вебінтерфейсу, який буде взаємодіяти з базою даних.

Під час обґрунтування архітектури також потрібно враховувати можливість подальшого розвитку системи. У сучасних RFID-рішеннях для складської логістики розглядаються складніші архітектури, у яких RFID поєднується з автономними пристроями, бездротовими мережами, хмарними сервісами та технологіями простежуваності. Такі підходи демонструють, що RFID може бути основою не лише локального обліку, а й повноцінної системи автоматизованого управління матеріальними потоками [22].

Для практичної реалізації важливо правильно визначити склад апаратних і програмних компонентів. Технічні рекомендації щодо побудови RFID-систем інвентаризації підкреслюють необхідність узгодженого вибору зчитувача, міток, антени, програмного забезпечення та способу інтеграції з базою даних або іншими інформаційними системами [23]. Тому архітектура розроблюваного комплексу має бути не надмірно складною, але достатньою для виконання основних функцій автоматизованої інвентаризації. Узагальнену архітектуру програмно-апаратного комплексу подано в таблиці 2.1.

Таблиця 2.1 – Основні компоненти архітектури програмно-апаратного комплексу

Компонент системи	Основне призначення
RFID-мітка	Зберігання унікального ідентифікатора об'єкта
RFID-зчитувач	Зчитування коду RFID-мітки
Мікроконтролер	Приймання, попередня обробка та передавання RFID-коду
Програмний модуль	Обробка ідентифікатора та взаємодія з базою даних
База даних	Збереження інформації про об'єкти інвентаризації
Інтерфейс користувача	Перегляд, додавання, редагування записів і формування звітів
Журнал подій	Фіксація операцій зчитування та змін у системі

2.2 Вибір RFID-зчитувача та RFID-міток

Вибір RFID-зчитувача та RFID-міток є важливим етапом проєктування програмно-апаратного комплексу інвентаризації, оскільки саме ці компоненти забезпечують первинне зчитування даних з об'єктів обліку. Для кваліфікаційної роботи доцільно обирати такі апаратні засоби, які є доступними, простими у підключенні, сумісними з мікроконтролерними платформами та достатніми для демонстрації принципу автоматизованої інвентаризації.

RFID-зчитувач виконує функцію приймання інформації з мітки. Він формує радіочастотне поле, активує RFID-мітку та отримує від неї унікальний ідентифікатор. Надалі цей ідентифікатор передається до мікроконтролера або

програмного модуля, де виконується його обробка. Для прототипу системи інвентаризації доцільним є використання RFID-модуля RC522, який працює на частоті 13,56 MHz і підтримує обмін даними через SPI-інтерфейс.

Перевагою RC522 є його низька вартість, компактність, наявність великої кількості прикладів підключення та сумісність з Arduino, ESP8266 і ESP32. Це робить його зручним для навчальних, лабораторних і демонстраційних систем. Водночас потрібно враховувати, що такий модуль має невелику дальність зчитування, тому він більше підходить для інвентаризації об'єктів, які можна піднести безпосередньо до зчитувача. Для великих складських приміщень або промислового обліку доцільніше використовувати UHF RFID-рішення, які забезпечують більшу відстань зчитування, однак вони є дорожчими і складнішими у налаштуванні [23].

RFID-мітки у системі виконують роль носіїв унікального коду об'єкта. Кожна мітка закріплюється на конкретній інвентарній одиниці та пов'язується з відповідним записом у базі даних. Для розроблюваного комплексу доцільно використовувати пасивні RFID-мітки у вигляді карток або брелоків. Вони не потребують власного джерела живлення, мають невисоку вартість і добре підходять для обліку обладнання, інструментів, навчальних засобів або інших матеріальних об'єктів.

Під час вибору RFID-міток слід враховувати умови їх використання. Якщо мітка буде прикріплюватися до пластикових, дерев'яних або паперових поверхонь, стандартних пасивних міток буде достатньо. Якщо ж об'єкти мають металевий корпус або експлуатуються в умовах підвищеної вологості, потрібно використовувати спеціалізовані мітки, призначені для складніших середовищ. У роботі розглянуто застосування стандартних міток, оскільки основним завданням є перевірка принципу роботи системи, а не промислова експлуатація. Основні характеристики обраних компонентів подано в таблиці 2.2.

Таблиця 2.2 – Характеристика RFID-зчитувача та RFID-міток для комплексу інвентаризації

Компонент	Обраний варіант	Призначення	Переваги
RFID-зчитувач	RC522	Зчитування UID мітки	Доступність, просте підключення, підтримка Arduino та ESP
Частотний діапазон	13,56 MHz	Радіочастотний обмін з міткою	Підходить для навчальних і локальних систем
Інтерфейс підключення	SPI	Передавання даних до мікроконтролера	Стабільна взаємодія з контролером
RFID-мітки	Пасивні картки або брелоки	Ідентифікація об'єктів	Низька вартість, відсутність батареї
Тип застосування	Локальна інвентаризація	Облік об'єктів у приміщенні	Простота реалізації прототипу

2.3 Вибір мікроконтролерної платформи

Мікроконтролерна платформа є центральною апаратною частиною програмно-апаратного комплексу, оскільки саме вона забезпечує приймання даних від RFID-зчитувача, їх попередню обробку та передавання до програмної частини системи. Під час вибору мікроконтролера необхідно враховувати сумісність із RFID-модулем, кількість доступних інтерфейсів, простоту програмування, можливість підключення до комп'ютера або мережі, вартість і перспективу подальшого розширення системи.

Для реалізації RFID-систем інвентаризації найчастіше використовуються такі платформи, як Arduino UNO, NodeMCU ESP8266 та ESP32. Arduino UNO є простим і поширеним рішенням для навчальних проєктів. Його перевагами є зрозуміле середовище розробки, велика кількість прикладів і стабільна робота з RFID-модулями. Однак Arduino UNO не має вбудованого Wi-Fi, тому для передавання даних у мережу потрібно використовувати додаткові модулі.

NodeMCU ESP8266 є більш функціональним варіантом для IoT-рішень, оскільки має вбудований Wi-Fi. Це дає змогу передавати RFID-дані до вебсервера, хмарної бази або локальної мережевої системи без використання додаткових комунікаційних модулів. У практичних RFID-системах інвентаризації NodeMCU часто застосовується саме як недорога платформа для поєднання RFID-зчитувача з мережевими сервісами [18].

ESP32 можна розглядати як найбільш універсальну платформу для розроблюваного комплексу. Він має вбудований Wi-Fi і Bluetooth, більшу продуктивність порівняно з ESP8266, більшу кількість виводів і кращі можливості для подальшого розширення системи. Це дає змогу не лише зчитувати RFID-мітки, а й у перспективі підключати дисплей, кнопки керування, модуль пам'яті, датчики або інші периферійні пристрої. У практичних проєктах RFID-інвентаризації використання ESP-платформ є доцільним через можливість створення компактного автономного пристрою з мережевим передаванням даних [21]. Для порівняння основних мікроконтролерних платформ доцільно подати їхні характеристики у таблиці 2.3.

Таблиця 2.3 – Порівняння мікроконтролерних платформ для RFID-комплексу

Платформа	Переваги	Недоліки	Доцільність використання
Arduino UNO	Простота програмування, доступність, велика кількість прикладів	Немає вбудованого Wi-Fi, менше ресурсів	Доцільний для базового локального прототипу
NodeMCU ESP8266	Вбудований Wi-Fi, низька вартість, компактність	Обмежена кількість виводів, менша продуктивність	Доцільний для простого IoT-рішення
ESP32	Wi-Fi, Bluetooth, більша продуктивність, більше інтерфейсів	Дещо складніше налаштування	Найбільш доцільний для розширюваного RFID-комплексу

Як видно з таблиці 2.3, Arduino UNO підходить для найпростішого варіанта системи, коли RFID-зчитувач підключається до комп'ютера через USB і не потребує мережевого обміну. NodeMCU ESP8266 є зручним варіантом для бюджетної системи з Wi-Fi. Проте ESP32 має ширші технічні можливості та краще відповідає вимогам до програмно-апаратного комплексу, який у майбутньому може бути доповнений вебінтерфейсом, хмарним збереженням даних або додатковими модулями.

У межах цієї кваліфікаційної роботи доцільно обрати ESP32 як основну мікроконтролерну платформу. Такий вибір пояснюється наявністю вбудованих засобів бездротового зв'язку, достатньою продуктивністю, підтримкою популярних інтерфейсів обміну даними та сумісністю з RFID-зчитувачем RC522. Крім того, ESP32 дає змогу реалізувати як локальний режим роботи, так і подальшу інтеграцію комплексу з мережевими або хмарними сервісами. Загальні рекомендації щодо побудови RFID-систем також підкреслюють важливість узгодженого вибору зчитувача, міток, програмного забезпечення та апаратної платформи [23].

2.4 Проєктування програмної архітектури системи

Програмна архітектура комплексу інвентаризації визначає логіку взаємодії між RFID-зчитувачем, мікроконтролером, базою даних та інтерфейсом користувача. Її основне завдання полягає в тому, щоб забезпечити приймання RFID-коду, його обробку, пошук відповідного запису в базі даних і відображення результату користувачу. У сучасних RFID-рішеннях програмна частина відіграє не менш важливу роль, ніж апаратна, оскільки саме вона забезпечує збереження, оновлення та подальше використання інвентаризаційних даних [13].

Для розроблюваного комплексу доцільно використати модульну програмну архітектуру. Вона передбачає поділ системи на окремі функціональні блоки: модуль зчитування RFID-коду, модуль обробки даних, модуль взаємодії з базою

даних, модуль інтерфейсу користувача та модуль формування звітів. Такий підхід спрощує розробку, оскільки кожен модуль виконує окреме завдання і може бути змінений або доповнений без повної перебудови системи.

Першим елементом програмної архітектури є модуль приймання даних від RFID-зчитувача. Він отримує унікальний ідентифікатор мітки від мікроконтролера ESP32. Передавання може здійснюватися через USB-з'єднання, послідовний порт або мережевий канал, якщо використовується Wi-Fi. Після отримання RFID-коду система перевіряє його коректність і передає до наступного модуля для подальшої обробки.

Другим елементом є модуль обробки RFID-ідентифікатора. Його завдання полягає у визначенні того, чи зареєстрована відповідна мітка в базі даних. Якщо RFID-код знайдено, система завантажує інформацію про об'єкт і відображає її користувачу. Якщо код відсутній, користувачеві може бути запропоновано створити новий інвентаризаційний запис. Така логіка дає змогу поєднати фізичне зчитування мітки з електронною картою об'єкта.

Третім важливим компонентом є модуль роботи з базою даних. Він забезпечує додавання, редагування, пошук і видалення записів, а також збереження історії зчитувань. База даних повинна містити інформацію про RFID-код, назву об'єкта, інвентарний номер, категорію, місце розташування, відповідальну особу, статус і дату додавання. Крім основної таблиці об'єктів, доцільно передбачити таблицю журналу подій, де фіксуватимуться операції зчитування та зміни даних. Такий підхід відповідає практиці побудови RFID-систем інвентаризації, у яких важливе значення має не лише ідентифікація об'єкта, а й подальше ведення електронного обліку [19].

Інтерфейс користувача має забезпечувати зручну взаємодію з системою. У ньому доцільно передбачити головне вікно зі списком об'єктів, форму додавання нового запису, поле пошуку, сторінку перегляду інформації про об'єкт і розділ журналу подій. Користувач повинен мати змогу швидко знайти об'єкт за RFID-кодом, інвентарним номером або назвою. Для кваліфікаційної роботи

достатньо реалізувати локальний інтерфейс або простий вебінтерфейс, який взаємодіє з базою даних.

Окремим модулем може бути модуль формування звітів. Він потрібний для створення підсумкової інформації про наявні об'єкти, результати інвентаризації, кількість зареєстрованих RFID-міток, об'єкти за категоріями або місцем розташування. У найпростішому варіанті звіт може формуватися у вигляді таблиці на екрані або експортуватися у файл. Це підвищує практичну цінність комплексу, оскільки користувач отримує не лише засіб зчитування міток, а й інструмент для ведення обліку. Узагальнену структуру програмної архітектури подано в таблиці 2.4.

Таблиця 2.4 – Основні програмні модулі комплексу інвентаризації

Програмний модуль	Основне призначення
Модуль приймання RFID-коду	Отримання унікального ідентифікатора мітки від мікроконтролера
Модуль обробки даних	Перевірка RFID-коду та визначення подальшої дії системи
Модуль бази даних	Збереження, пошук, редагування та видалення інвентаризаційних записів
Модуль інтерфейсу користувача	Відображення інформації, введення даних і керування записами
Модуль журналу подій	Фіксація зчитувань, змін і дій користувача
Модуль звітності	Формування підсумкових даних про об'єкти інвентаризації

Загальний алгоритм взаємодії програмних модулів можна описати таким чином. Спочатку користувач запускає систему, після чого ініціалізується RFID-зчитувач. Коли мітка підноситься до зчитувача, її код передається до програмної частини. Система виконує пошук у базі даних. Якщо об'єкт знайдено, на екрані відображається його картка. Якщо об'єкт не зареєстрований, користувач може додати його до бази. Після кожної операції відповідна подія записується до журналу.

2.5 Вибір бази даних та способу збереження інвентаризаційних записів

База даних є важливим елементом програмно-апаратного комплексу інвентаризації, оскільки саме в ній зберігається інформація про об'єкти, RFID-мітки, місце розташування, відповідальних осіб і результати зчитування. Якщо RFID-зчитувач і мікроконтролер забезпечують фізичне отримання ідентифікатора, то база даних забезпечує логічний зв'язок між цим ідентифікатором та конкретним матеріальним об'єктом.

Для розроблюваного комплексу база даних повинна виконувати кілька основних функцій: збереження інформації про об'єкти інвентаризації, пошук запису за RFID-кодом, оновлення відомостей про об'єкт, фіксацію подій зчитування та формування звітної інформації. Такий підхід відповідає практичним RFID-рішенням, у яких зчитування мітки поєднується з електронною картою об'єкта та подальшим веденням інвентаризаційного обліку [20].

Для реалізації системи можна розглянути кілька варіантів баз даних: SQLite, MySQL, PostgreSQL або хмарні бази даних. SQLite є простим локальним рішенням, яке не потребує встановлення окремого сервера. Вона добре підходить для навчальних, демонстраційних і невеликих прикладних систем. MySQL і PostgreSQL доцільно використовувати тоді, коли система має працювати в мережевому режимі, підтримувати кількох користувачів або зберігати більші обсяги даних. Хмарні бази даних можуть застосовуватися у випадку, якщо комплекс розвивається як IoT-рішення з віддаленим доступом до інвентаризаційної інформації.

У межах цієї кваліфікаційної роботи доцільно обрати SQLite як базу даних для локального прототипу. Такий вибір пояснюється простотою налаштування, відсутністю потреби в окремому сервері, достатньою функціональністю для збереження інвентаризаційних записів і зручністю інтеграції з програмним інтерфейсом. SQLite дає змогу реалізувати основні операції: додавання,

редагування, видалення, пошук і перегляд записів. Крім того, файл бази даних легко переносити, резервувати та використовувати під час тестування системи.

Основною таблицею бази даних має бути таблиця об'єктів інвентаризації. У ній доцільно зберігати унікальний RFID-код, інвентарний номер, назву об'єкта, категорію, місце розташування, відповідальну особу, статус і дату створення запису. Саме ця таблиця забезпечує зв'язок між фізичною RFID-міткою та електронною інформацією про об'єкт.

Окрім основної таблиці, доцільно передбачити таблицю журналу подій. Вона потрібна для збереження історії зчитування RFID-міток, фіксації змін у записах, переміщення об'єктів або виконання інвентаризаційних операцій. Наявність такого журналу підвищує прозорість роботи системи та дає змогу перевірити, коли саме певний об'єкт був зчитаний або змінений у базі даних. У практичних RFID-системах, побудованих на базі мікроконтролерів і мережевих модулів, журналювання подій є важливим елементом контролю роботи інвентаризаційного комплексу [21]. Орієнтовну структуру бази даних подано в таблиці 2.5.

Таблиця 2.5 – Орієнтовна структура бази даних RFID-комплексу

Таблиця	Основні поля	Призначення
Objects	id, rfid_uid, inventory_number, name, category, location, responsible_person, status, created_at	Збереження основної інформації про об'єкти інвентаризації
EventLog	id, rfid_uid, action, date_time, user, comment	Фіксація зчитувань, змін і дій користувача
Users	id, username, password_hash, role	Збереження даних користувачів системи
Categories	id, category_name, description	Групування об'єктів за типами або призначенням
Locations	id, location_name, description	Збереження місць розташування об'єктів

Для забезпечення цілісності даних необхідно передбачити унікальність поля `rfid_uid`, оскільки одна RFID-мітка має відповідати лише одному об'єкту. Також доцільно використовувати унікальний інвентарний номер, який може застосовуватися для ручного пошуку об'єкта. Поля `category`, `location` і `responsible_person` дають змогу систематизувати записи та швидко формувати звіти за різними критеріями.

Спосіб збереження даних у системі може бути організований за локальною або мережевою моделлю. У локальній моделі база даних зберігається на комп'ютері, де встановлено програмний інтерфейс користувача. У мережевій моделі дані можуть передаватися від ESP32 до серверної частини через Wi-Fi, після чого зберігатися у віддаленій базі даних. Такий варіант є складнішим, але забезпечує кращу масштабованість і можливість доступу з кількох пристроїв.

2.6 Забезпечення інформаційної безпеки RFID-системи

Під час проєктування програмно-апаратного комплексу для інвентаризації з використанням RFID-міток необхідно враховувати не лише функціональність системи, а й питання інформаційної безпеки. RFID-система працює з даними про матеріальні об'єкти, їх місцезнаходження, відповідальних осіб, статуси та історію зчитувань. Тому несанкціонований доступ до таких даних може призвести до викривлення облікової інформації, втрати контролю над майном або помилок під час інвентаризації.

Однією з основних загроз для RFID-систем є несанкціоноване зчитування міток. Якщо RFID-мітка містить лише відкритий унікальний ідентифікатор, сторонній пристрій потенційно може зчитати цей код. Для базового прототипу така загроза не є критичною, оскільки система використовується в навчальних або локальних умовах. Однак у реальних умовах експлуатації необхідно передбачати контроль доступу до зчитувача, обмеження фізичного доступу до міток і захист програмної частини системи. У дослідженнях RFID-IoT архітектур

для інтелектуального управління інвентаризацією наголошується, що питання безпеки та інтеграції мають враховуватися ще на етапі проектування системи [12].

Другою важливою загрозою є несанкціонована зміна записів у базі даних. Якщо користувач без відповідних прав зможе змінити назву об'єкта, його місцезнаходження, статус або відповідальну особу, це може порушити достовірність інвентаризаційних даних. Тому в програмній частині комплексу доцільно передбачити авторизацію користувачів і розмежування прав доступу. Наприклад, звичайний користувач може лише переглядати об'єкти та виконувати зчитування міток, а адміністратор – додавати, редагувати й видаляти записи.

Окрему увагу потрібно приділити захисту бази даних. Для локального прототипу достатньо передбачити резервне копіювання файлу бази даних, обмеження доступу до програми та збереження паролів у захищеному вигляді. Якщо система буде розвиватися як мережева або хмарна, необхідно використовувати захищене з'єднання, контроль облікових записів, регулярне резервне копіювання та журналювання дій користувачів. Під час інтеграції RFID із корпоративними або ERP-системами безпека стає ще важливішою, оскільки інвентаризаційні дані можуть бути пов'язані з фінансовим, складським або управлінським обліком [13].

Важливим елементом захисту є журнал подій. Він дає змогу фіксувати, коли саме була зчитана RFID-мітка, хто виконав дію, який запис було змінено та який результат отримано. Журналювання підвищує прозорість роботи системи і допомагає виявити помилки або підозрілі дії. Для розроблюваного комплексу доцільно передбачити простий журнал подій, у якому зберігатимуться дата, час, RFID-код, тип операції та користувач. Основні заходи безпеки для RFID-комплексу подано в таблиці 2.6.

Таблиця 2.6 – Заходи інформаційної безпеки RFID-системи

Загроза	Можливий наслідок	Захід захисту
Несанкціоноване зчитування RFID-мітки	Отримання сторонньою особою ідентифікатора об'єкта	Обмеження фізичного доступу до зчитувача та міток
Несанкціонована зміна записів	Викривлення інвентаризаційних даних	Авторизація користувачів і розмежування прав
Втрата бази даних	Неможливість відновлення облікової інформації	Регулярне резервне копіювання
Помилки користувача	Неправильне додавання або редагування об'єктів	Перевірка введених даних і журналювання дій
Несанкціонований доступ до програми	Перегляд або зміна службової інформації	Використання облікових записів і паролів
Порушення цілісності даних	Невідповідність між RFID-міткою та об'єктом	Унікальність RFID-коду в базі даних

РОЗДІЛ 3

РОЗРОБКА ПРОГРАМНО-АПАРАТНОГО КОМПЛЕКСУ ДЛЯ ІНВЕНТАРИЗАЦІЇ

3.1 Розробка структурної схеми комплексу

Розробка програмно-апаратного комплексу для інвентаризації з використанням RFID-міток передбачає побудову цілісної системи, у якій апаратні компоненти забезпечують зчитування ідентифікатора об'єкта, а програмні модулі виконують його обробку, збереження та відображення користувачу. Основна ідея комплексу полягає у тому, що кожному матеріальному об'єкту відповідає окрема RFID-мітка з унікальним кодом, який використовується як ключ для пошуку інформації в базі даних.

Структурна схема комплексу (рис. 3.1) має відображати послідовність проходження даних від фізичного об'єкта до програмної системи. У межах розроблюваного рішення основними компонентами є RFID-мітка, RFID-зчитувач RC522, мікроконтролер ESP32, програмний модуль обробки даних, база даних SQLite та інтерфейс користувача.



Рисунок 3.1 – Структурна схема програмно-апаратного комплексу для інвентаризації з використанням RFID-міток

У поданій схемі RFID-мітка виконує роль носія унікального ідентифікатора. Вона закріплюється на об'єкті інвентаризації, наприклад на обладнанні, інструменті, лабораторному пристрої або іншій матеріальній одиниці. Під час зчитування RFID-зчитувач отримує UID мітки та передає його до мікроконтролера ESP32. Мікроконтролер, у свою чергу, забезпечує приймання даних, їх первинну обробку та передавання до програмної частини комплексу.

Програмний модуль приймає RFID-код і виконує перевірку його наявності в базі даних. Якщо відповідний запис знайдено, система відображає інформацію про об'єкт: назву, інвентарний номер, категорію, місце розташування, відповідальну особу та статус. Якщо RFID-код відсутній у базі, користувач може створити новий запис і прив'язати мітку до конкретного об'єкта. Основні компоненти структурної схеми та їх призначення подано в таблиці 3.1.

Таблиця 3.1 – Компоненти структурної схеми RFID-комплексу

Компонент	Призначення	Результат роботи
Об'єкт інвентаризації	Матеріальний об'єкт, який підлягає обліку	Фізична одиниця майна
RFID-мітка	Зберігання унікального ідентифікатора	UID мітки
RFID-зчитувач RC522	Зчитування RFID-коду	Отриманий UID
ESP32	Приймання та передавання даних	Переданий код до програми
Програмний модуль	Обробка UID і пошук запису	Виявлення об'єкта або створення нового запису
База даних SQLite	Збереження інвентаризаційних записів	Електронна картка об'єкта
Інтерфейс користувача	Відображення та редагування даних	Робота користувача із системою
Журнал подій	Фіксація зчитувань і змін	Історія операцій

Для формалізації роботи комплексу можна подати математичну модель відповідності між RFID-мітками та об'єктами інвентаризації. Нехай множина RFID-міток позначається як:

$$M = \{m_1, m_2, m_3, \dots, m_n\},$$

де m_i – окрема RFID-мітка, закріплена за певним об'єктом.

Множина об'єктів інвентаризації позначається як:

$$O = \{o_1, o_2, o_3, \dots, o_n\},$$

де o_i – окремий матеріальний об'єкт, який обліковується в системі.

Тоді зв'язок між RFID-міткою та об'єктом можна описати функцією:

$$f: M \rightarrow O,$$

де кожній RFID-мітці m_i відповідає один об'єкт o_i .

Для коректної роботи системи має виконуватися умова унікальності:

$$m_i \neq m_j, \text{ якщо } i \neq j.$$

Це означає, що дві різні RFID-мітки не повинні мати однаковий UID. Також одна RFID-мітка має бути прив'язана лише до одного об'єкта інвентаризації. У базі даних це забезпечується унікальністю поля `rfid_uid`.

Процес зчитування RFID-мітки можна подати у вигляді послідовності станів:

S0 – очікування мітки;

S1 – виявлення RFID-мітки;

S2 – зчитування UID;

S3 – передавання UID до програмного модуля;

S4 – пошук UID у базі даних;

S5 – відображення результату користувачу;

S6 – запис події до журналу.

Така модель показує, що система працює циклічно: після завершення однієї операції зчитування вона повертається до стану очікування наступної RFID-мітки.

Для оцінювання ефективності роботи комплексу можна використати показник часу інвентаризації:

$$T_{\text{заг}} = n \times t_{\text{зч}},$$

де $T_{\text{заг}}$ – загальний час зчитування об'єктів, n – кількість об'єктів інвентаризації, $t_{\text{зч}}$ – середній час зчитування однієї RFID-мітки.

Якщо порівнювати RFID-інвентаризацію з ручною перевіркою, можна використати коефіцієнт скорочення часу:

$$K = T_{\text{руч}} / T_{\text{RFID}},$$

де $T_{\text{руч}}$ – час ручної інвентаризації, T_{RFID} – час інвентаризації з використанням RFID.

Якщо $K > 1$, то RFID-комплекс забезпечує скорочення часу виконання інвентаризації порівняно з ручним способом.

3.2 Реалізація апаратної частини системи

Апаратна частина (рис. 3.2) програмно-апаратного комплексу призначена для зчитування RFID-міток, передавання їх унікальних ідентифікаторів до мікроконтролера та подальшої передачі отриманих даних у програмний модуль. У межах розроблюваної системи апаратна частина будується на основі RFID-зчитувача RC522, мікроконтролерної плати ESP32 та пасивних RFID-міток.

Основу апаратної реалізації становить взаємодія трьох ключових елементів: RFID-мітки, зчитувача RC522 та ESP32. RFID-мітка містить унікальний код UID, який використовується для ідентифікації об'єкта інвентаризації. Зчитувач RC522 формує радіочастотне поле на частоті 13,56 MHz, активує мітку та отримує її UID. Далі код передається до ESP32 через SPI-інтерфейс.

Схематично апаратну взаємодію можна подати так:



Рисунок 3.2 – Схема взаємодії апаратних компонентів RFID-комплексу

Для реалізації апаратної частини використано компоненти, наведені в таблиці 3.2.

Таблиця 3.2 – Основні апаратні компоненти RFID-комплексу

Компонент	Призначення	Особливості використання
ESP32	Приймання та передавання RFID-даних	Має Wi-Fi, достатню кількість цифрових виводів і підтримує SPI
RFID RC522	Зчитування UID RFID-мітки	Працює на частоті 13,56 МГц, підключається через SPI
RFID-картка або брелок	Ідентифікація об'єкта	Містить унікальний код, який прив'язується до запису в базі даних
USB-кабель	Живлення та програмування ESP32	Забезпечує підключення до комп'ютера
З'єднувальні дроти	Підключення RC522 до ESP32	Використовуються для SPI-з'єднання
Макетна плата	Монтаж елементів прототипу	Спрощує тестове підключення компонентів

Як видно з таблиці 3.2, обрана елементна база є достатньою для створення прототипу RFID-системи інвентаризації. ESP32 забезпечує керування зчитувачем і передавання даних, а RC522 виконує функцію первинного зчитування RFID-міток.

Підключення RC522 до ESP32 виконується через SPI-інтерфейс. Цей інтерфейс передбачає використання окремих ліній для передавання даних, приймання даних, синхронізації та вибору пристрою. Орієнтовне підключення контактів наведено в таблиці 3.3.

Таблиця 3.3 – Підключення RFID-зчитувача RC522 до ESP32

Контакт RC522	Призначення	Контакт ESP32
SDA / SS	Вибір пристрою SPI	GPIO 5
SCK	Тактовий сигнал	GPIO 18
MOSI	Передавання даних від ESP32 до RC522	GPIO 23
MISO	Передавання даних від RC522 до ESP32	GPIO 19
RST	Скидання модуля	GPIO 22
3.3V	Живлення модуля	3.3V
GND	Загальний провід	GND

Після підключення модуль RC522 отримує живлення від ESP32 з напругою 3,3 V. Важливо враховувати, що RFID-зчитувач RC522 не слід підключати до 5 V, оскільки це може призвести до пошкодження модуля. Спільний провід GND є обов'язковим для коректної роботи всіх компонентів.

Логіку роботи апаратної частини можна описати послідовністю операцій:

- 1) ESP32 ініціалізує SPI-інтерфейс;
- 2) RFID-зчитувач RC522 переходить у режим очікування мітки;
- 3) користувач підносить RFID-мітку до зчитувача;
- 4) RC522 зчитує UID мітки;
- 5) UID передається до ESP32;
- 6) ESP32 передає отриманий код у програмну частину.

Для формального опису процесу зчитування можна використати модель:

$$\text{UID} = R(m),$$

де UID – унікальний ідентифікатор RFID-мітки; R – функція зчитування, яку виконує RFID-зчитувач; m – RFID-мітка, прикріплена до об’єкта.

Передавання даних від зчитувача до мікроконтролера можна подати як:

$$D = \{\text{UID}, t\},$$

де D – набір даних, переданий до ESP32; UID – код RFID-мітки; t – час зчитування мітки.

У такій моделі UID використовується як основний ключ для пошуку об’єкта в базі даних, а час t може бути використаний для формування журналу подій.

Для перевірки працездатності апаратної частини необхідно виконати тестове зчитування кількох RFID-міток. Якщо підключення виконано правильно, ESP32 має отримати UID кожної мітки та передати його до програмного модуля або вивести в монітор послідовного порту. На цьому етапі перевіряється стабільність живлення, правильність підключення SPI-ліній і коректність роботи зчитувача.

3.3 Розробка алгоритму роботи RFID-комплексу

Алгоритм роботи програмно-апаратного комплексу визначає послідовність дій, які виконуються від моменту зчитування RFID-мітки до відображення інформації про об’єкт у програмному інтерфейсі. Основна логіка системи полягає в тому, що RFID-код використовується як унікальний ключ для пошуку відповідного запису в базі даних. Подібний підхід застосовується у практичних RFID-системах інвентаризації, де зчитувач передає код мітки до програмного модуля, а система виконує ідентифікацію об’єкта та фіксацію події [17].

У розроблюваному комплексі алгоритм (рис. 3.) має забезпечувати такі основні операції: запуск системи, ініціалізацію RFID-зчитувача, очікування мітки, зчитування UID, передавання даних до програмного модуля, пошук запису

в базі даних, виведення результату користувачу та запис події до журналу. Якщо мітка вже зареєстрована, система відображає інформацію про об'єкт. Якщо мітка нова, користувач може додати її до бази даних.

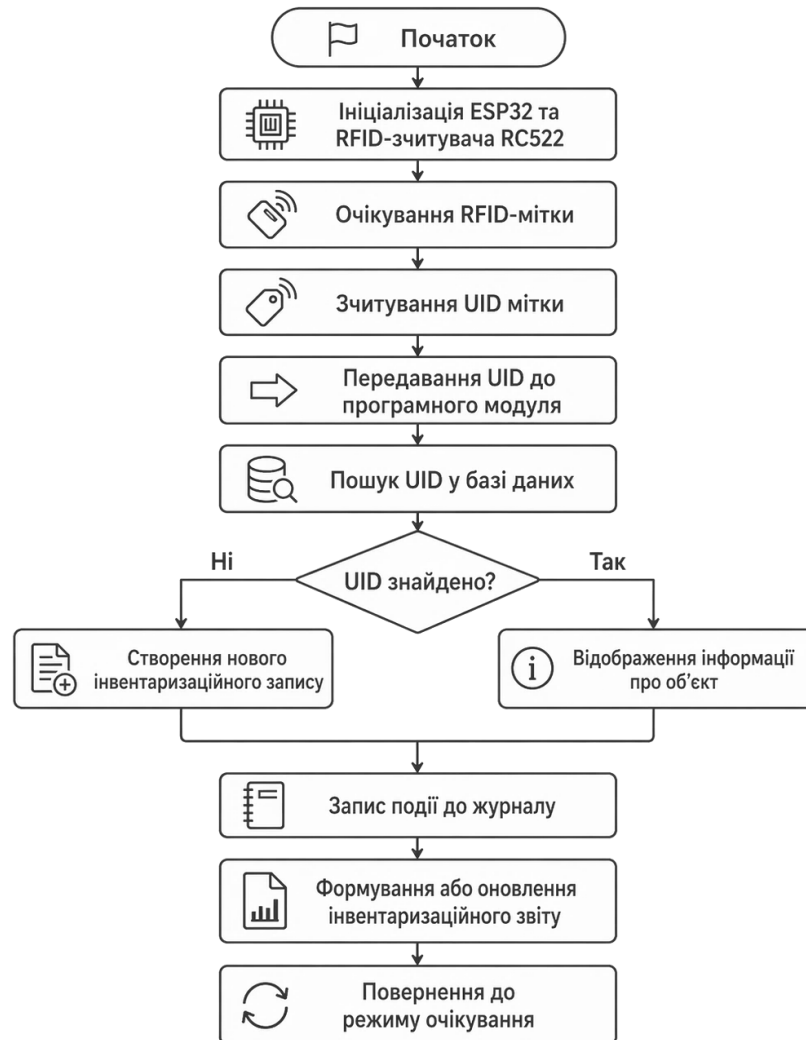


Рисунок 3.3 – Алгоритм роботи програмно-апаратного комплексу інвентаризації

Основні етапи алгоритму подано в таблиці 3.4.

Таблиця 3.4 – Етапи роботи алгоритму RFID-комплексу

Етап	Дія системи	Результат
1	Запуск програмно-апаратного комплексу	Система переходить у початковий стан
2	Ініціалізація ESP32 та RC522	Підготовка апаратних модулів до роботи
3	Очікування RFID-мітки	Система перебуває в режимі сканування

Продовження таблиці 3.4

Етап	Дія системи	Результат
4	Зчитування UID	Отримання унікального коду мітки
5	Передавання UID до програми	Дані надходять у програмний модуль
6	Пошук UID у базі даних	Визначення наявності об'єкта
7	Відображення результату	Користувач бачить інформацію про об'єкт
8	Запис події до журналу	Фіксується факт зчитування або зміни
9	Повернення до очікування	Система готова до наступної операції

Для формального опису алгоритму введемо такі позначення:

U – множина RFID-кодів, зчитаних системою;

B – множина записів у базі даних;

u – поточний RFID-код;

b – запис про об'єкт у базі даних.

Тоді перевірку наявності об'єкта можна подати так:

$$F(u) = 1, \text{ якщо } u \in B, F(u) = 0, \text{ якщо } u \notin B,$$

де $F(u)$ – функція перевірки наявності RFID-коду в базі даних.

Якщо $F(u) = 1$, система виконує операцію пошуку та відображення даних:

$$O = \text{Search}(u),$$

де O – інформація про знайдений об'єкт.

Якщо $F(u) = 0$, система переходить до створення нового запису:

$$B = B \cup \{u, \text{name}, \text{inventory_number}, \text{category}, \text{location}, \text{responsible_person}, \text{status}\}.$$

Це означає, що до бази даних додається новий об'єкт, який пов'язується з відповідним RFID-кодом.

Для фіксації подій використовується журнал:

$$L = \{l_1, l_2, l_3, \dots, l_n\},$$

де l_i – окремий запис журналу подій.

Кожен запис журналу можна описати як:

$$l_i = \{u, \text{action}, t, \text{user}\},$$

де u – RFID-код мітки; $action$ – виконана дія; t – дата і час операції; $user$ – користувач системи.

З погляду програмної реалізації алгоритм може бути поданий у вигляді псевдокоду (рис. 3.4).

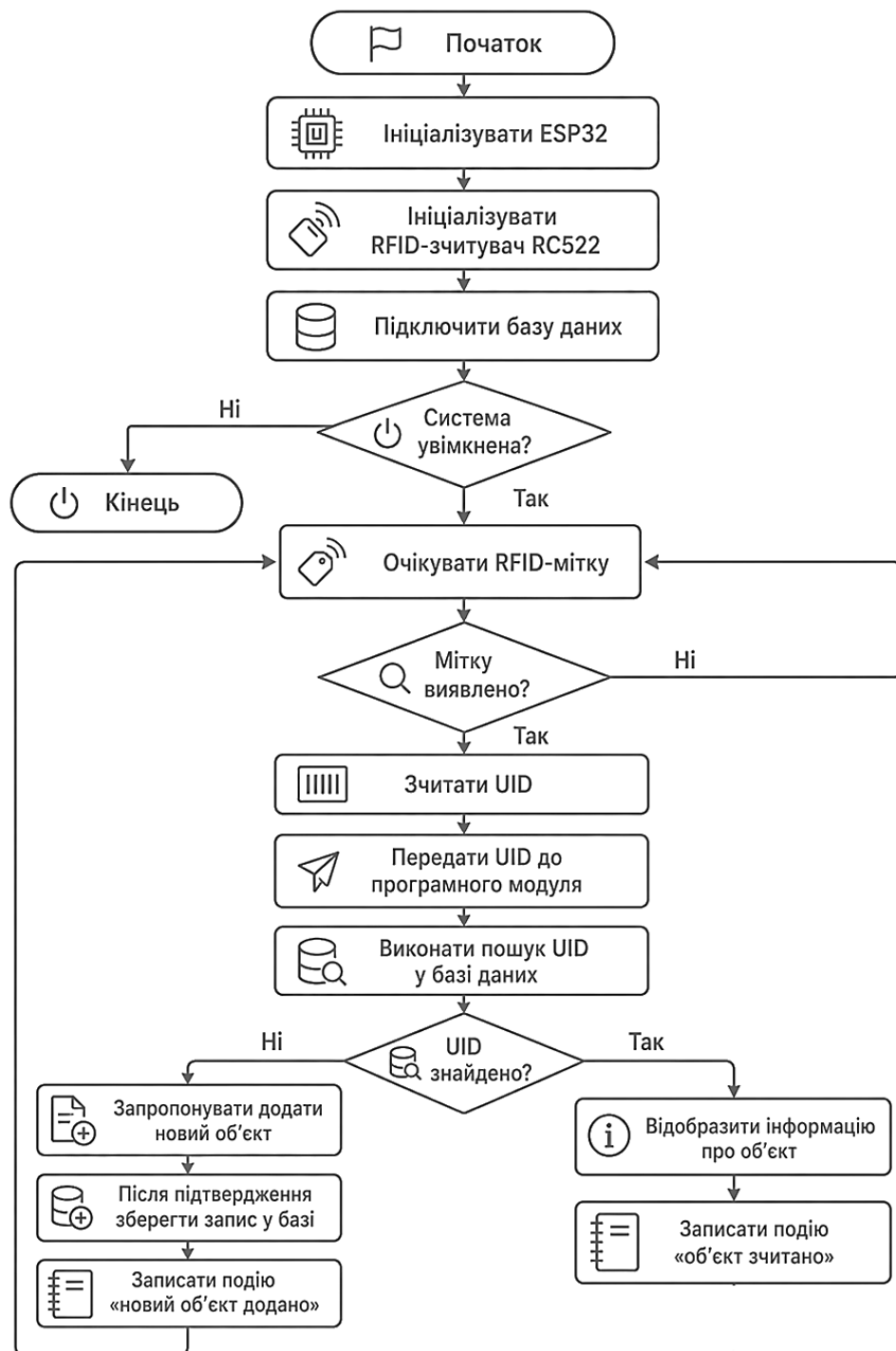


Рисунок 3.4 – Блок схема алгоритму

У разі використання ESP32 алгоритм може бути розширений за рахунок передавання UID через Wi-Fi до серверної частини або вебзастосунку. Такий підхід характерний для IoT-орієнтованих RFID-систем, у яких мікроконтролер виконує роль проміжної ланки між RFID-зчитувачем і віддаленою базою даних [18].

Для оцінювання швидкодії алгоритму можна використати середній час обробки однієї мітки:

$$t_{об} = t_{зч} + t_{пер} + t_{пош} + t_{від},$$

де $t_{об}$ – загальний час обробки RFID-мітки; $t_{зч}$ – час зчитування UID; $t_{пер}$ – час передавання даних до програмного модуля; $t_{пош}$ – час пошуку в базі даних; $t_{від}$ – час відображення результату користувачу.

Загальний час інвентаризації n об'єктів визначається як:

$$T = n \times t_{об}.$$

Чим меншим є значення $t_{об}$, тим швидше система виконує інвентаризацію. Тому під час розробки важливо оптимізувати не лише апаратне зчитування, а й пошук у базі даних, структуру таблиць і роботу інтерфейсу користувача.

3.4 Проєктування бази даних інвентаризації

База даних є центральним елементом програмної частини RFID-комплексу, оскільки саме вона забезпечує збереження інформації про об'єкти інвентаризації, RFID-мітки, користувачів, місця розташування та журнал подій. Якщо апаратна частина відповідає за зчитування UID мітки, то база даних забезпечує зв'язок між цим UID і конкретним матеріальним об'єктом. У практичних RFID-системах інвентаризації база даних використовується для реєстрації об'єктів, пошуку записів, оновлення статусів і формування звітів [19].

Для розроблюваного комплексу доцільно використати реляційну модель бази даних. Такий підхід є зручним, оскільки дані про об'єкти, категорії, користувачів і події можна подати у вигляді взаємопов'язаних таблиць. Як базове

рішення для прототипу може бути використана SQLite, оскільки вона не потребує окремого сервера, має просту структуру збереження та добре підходить для локальних програмних систем. У роботах, присвячених недорогим RFID-системам лабораторної інвентаризації, також підкреслюється доцільність використання простих баз даних для швидкого впровадження прототипу [20].

Структуру бази даних (рис. 3.5) доцільно побудувати з кількох основних таблиць: Objects, Categories, Locations, Users та EventLog. Основною є таблиця Objects, у якій зберігається інформація про кожний об'єкт інвентаризації. Таблиці Categories і Locations потрібні для впорядкування записів, Users – для обліку користувачів системи, а EventLog – для фіксації операцій зчитування, додавання, редагування або зміни статусу об'єкта.

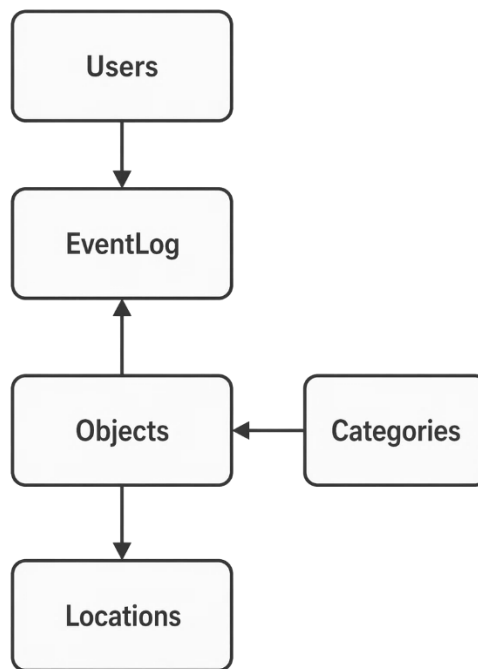


Рисунок 3.5 – Логічна схема бази даних RFID-комплексу

У цій схемі таблиця Objects пов'язана з категоріями та місцями розташування. Таблиця EventLog зберігає історію дій, пов'язаних із конкретним RFID-кодом або об'єктом. Таблиця Users дає змогу визначити, який користувач виконав певну операцію. Така структура забезпечує не лише збереження

основних інвентаризаційних даних, а й контроль історії роботи системи. Орієнтовну структуру таблиць бази даних подано в таблиці 3.5.

Таблиця 3.5 – Структура бази даних програмно-апаратного комплексу

Назва таблиці	Основні поля	Призначення
Objects	id, rfid_uid, inventory_number, name, category_id, location_id, responsible_person, status, created_at	Збереження даних про об'єкти інвентаризації
Categories	id, category_name, description	Збереження категорій об'єктів
Locations	id, location_name, description	Збереження місць розташування об'єктів
Users	id, username, password_hash, role	Збереження даних користувачів системи
EventLog	id, object_id, rfid_uid, action, user_id, date_time, comment	Фіксація подій, зчитувань і змін у системі

Основне поле таблиці Objects – rfid_uid. Воно має бути унікальним, оскільки одна RFID-мітка повинна відповідати лише одному об'єкту. Поле inventory_number також доцільно зробити унікальним, адже воно використовується як традиційний інвентарний номер. Поля category_id і location_id забезпечують зв'язок з відповідними довідниками категорій і місць розташування.

Для формалізації структури бази даних можна подати її у вигляді множин.

Нехай:

$O = \{o_1, o_2, \dots, o_n\}$ – множина об'єктів інвентаризації;

$R = \{r_1, r_2, \dots, r_n\}$ – множина RFID-ідентифікаторів;

$C = \{c_1, c_2, \dots, c_k\}$ – множина категорій;

$L = \{l_1, l_2, \dots, l_m\}$ – множина місць розташування.

Зв'язок між RFID-ідентифікатором і об'єктом можна описати функцією:

$$f: R \rightarrow O,$$

де кожному RFID-коду r_i відповідає один об'єкт o_i .

Для забезпечення коректності бази даних має виконуватися умова унікальності:

$$r_i \neq r_j, \text{ якщо } i \neq j.$$

Це означає, що два різні об'єкти не можуть мати однаковий RFID-код. У базі даних така умова реалізується через обмеження UNIQUE для поля rfid_uid.

Запис про об'єкт можна подати у вигляді кортежу:

$$o_i = \{id, rfid_uid, inventory_number, name, category, location, responsible_person, status\}.$$

Запис журналу подій можна описати так:

$$e_j = \{object_id, rfid_uid, action, user_id, date_time\},$$

де e_j – окрема подія в системі; object_id – ідентифікатор об'єкта; rfid_uid – код RFID-мітки; action – виконана дія; user_id – користувач, який виконав операцію; date_time – дата й час події.

Для практичної реалізації структури таблиці Objects можна використати такий SQL-опис (лістинг 3.1).

Лістинг 3.1 – Опис структури таблиці

```
CREATE TABLE Objects (
  id INTEGER PRIMARY KEY AUTOINCREMENT,
  rfid_uid TEXT NOT NULL UNIQUE,
  inventory_number TEXT NOT NULL UNIQUE,
  name TEXT NOT NULL,
  category_id INTEGER,
  location_id INTEGER,
  responsible_person TEXT,
  status TEXT,
  created_at TEXT,
  FOREIGN KEY (category_id) REFERENCES Categories(id),
  FOREIGN KEY (location_id) REFERENCES Locations(id)
);
```

кінець лістингу 3.1

Для журналу подій доцільно створити окрему таблицю.

Лістинг 3.2 – Створення окремої таблиці

```
CREATE TABLE EventLog (  
  id INTEGER PRIMARY KEY AUTOINCREMENT,  
  object_id INTEGER,  
  rfid_uid TEXT NOT NULL,  
  action TEXT NOT NULL,  
  user_id INTEGER,  
  date_time TEXT NOT NULL,  
  comment TEXT,  
  FOREIGN KEY (object_id) REFERENCES Objects(id),  
  FOREIGN KEY (user_id) REFERENCES Users(id)  
);
```

кінець лістингу 3.2

Під час роботи системи (рис. 3.6) база даних виконує кілька основних операцій. Після зчитування RFID-мітки програмний модуль надсилає запит на пошук відповідного UID. Якщо запис знайдено, система відображає інформацію про об'єкт. Якщо запис відсутній, користувач може створити нову картку об'єкта. У разі кожної операції в таблицю EventLog додається новий запис. Подібна логіка використовується в RFID-рішеннях, де мікроконтролер або NodeMCU передає RFID-дані до програмної системи для подальшого збереження й обробки [21].

3.5 Розробка програмного інтерфейсу користувача

Програмний інтерфейс користувача є важливою складовою RFID-комплексу, оскільки саме через нього здійснюється взаємодія оператора з базою даних інвентаризації. Якщо апаратна частина відповідає за зчитування RFID-міток, то інтерфейс забезпечує перегляд, додавання, редагування, пошук і контроль об'єктів. У практичних RFID-системах інвентаризації інтерфейс

користувача виконує роль проміжної ланки між фізичним зчитуванням мітки та електронним обліком об'єктів [20].

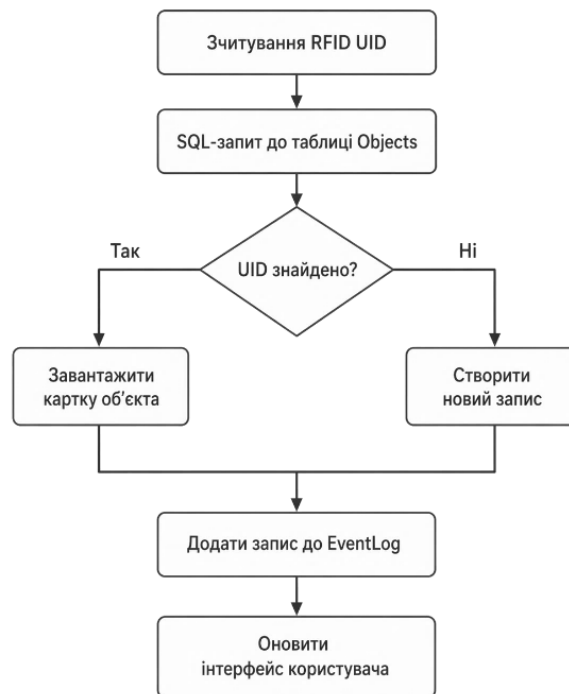


Рисунок 3.6 – Схема взаємодії програмного модуля з базою даних

Для розроблюваного комплексу доцільно передбачити простий локальний або веборієнтований інтерфейс (рис. 3.7). Його структура має бути зрозумілою для користувача, який виконує інвентаризацію, і не вимагати спеціальних технічних знань. Основними елементами інтерфейсу є головне вікно, форма додавання об'єкта, форма редагування запису, сторінка пошуку, журнал подій і блок формування звітів.

Головне вікно системи повинно містити перелік зареєстрованих об'єктів. Для кожного об'єкта доцільно відображати назву, інвентарний номер, RFID-код, категорію, місце розташування, відповідальну особу та статус. Це дає змогу користувачу швидко оцінити поточний стан інвентаризаційної бази.

Форма додавання нового об'єкта використовується тоді, коли система зчитала RFID-мітку, якої ще немає в базі даних. У такому випадку користувач вводить назву об'єкта, інвентарний номер, категорію, місце розташування,

відповідальну особу та статус. RFID-код може заповнюватися автоматично після зчитування мітки.



Рисунок 3.7 – Структура програмного інтерфейсу RFID-комплексу

Основні елементи інтерфейсу користувача подано в таблиці 3.6.

Таблиця 3.6 – Елементи програмного інтерфейсу користувача

Елемент інтерфейсу	Призначення	Основні дії користувача
Головне вікно	Відображення загального списку об'єктів	Перегляд, сортування, вибір запису
Поле пошуку	Швидкий пошук об'єкта	Пошук за RFID-кодом, назвою або інвентарним номером
Картка об'єкта	Перегляд повної інформації	Перевірка даних, зміна статусу
Форма додавання	Реєстрація нового об'єкта	Введення даних і прив'язка RFID-мітки
Форма редагування	Оновлення інформації	Зміна місця, відповідальної особи або статусу
Журнал подій	Контроль операцій у системі	Перегляд історії зчитувань і змін
Модуль звітів	Підготовка результатів інвентаризації	Формування таблиці або експорт даних

Важливою функцією інтерфейсу є пошук об'єкта. Після зчитування RFID-мітки система автоматично виконує запит до бази даних. Якщо запис знайдено, відкривається картка відповідного об'єкта. Якщо запис відсутній, користувач отримує повідомлення про необхідність створення нового запису. Така логіка відповідає підходу, коли RFID-код використовується як ключ доступу до електронної картки об'єкта [21].

Для формалізації роботи інтерфейсу можна подати множину основних операцій користувача:

$$A = \{a_1, a_2, a_3, a_4, a_5\},$$

де

a_1 – перегляд списку об'єктів;

a_2 – додавання нового об'єкта;

a_3 – редагування запису;

a_4 – пошук об'єкта;

a_5 – формування звіту.

Кожна операція виконується над множиною об'єктів інвентаризації:

$$O = \{o_1, o_2, \dots, o_n\},$$

де o_i - окремий об'єкт у базі даних.

Операцію пошуку можна описати функцією:

$$P(x) \rightarrow o_i,$$

де P – функція пошуку; x – RFID-код, інвентарний номер або назва об'єкта; o_i – знайдений об'єкт інвентаризації.

Якщо значення x не відповідає жодному запису, результат пошуку можна подати так:

$$P(x) = \emptyset.$$

У такому випадку система повинна запропонувати користувачу створити новий запис.

Для забезпечення базової інформаційної безпеки інтерфейс має підтримувати розмежування прав доступу (таблиця 3.7). Наприклад,

адміністратор може додавати, редагувати й видаляти записи, а звичайний користувач – лише переглядати об’єкти та виконувати інвентаризаційне зчитування.

Розроблений програмний інтерфейс (рис. 3.8) є складовою частиною створеного програмно-апаратного продукту, який поєднує фізичний пристрій зчитування RFID-міток та програмну систему обліку інвентаризаційних даних.

Таблиця 3.7 – Матриця прав доступу користувачів

Дія	Адміністратор	Оператор
Перегляд об’єктів	+	+
Пошук об’єкта	+	+
Додавання запису	+	+
Редагування запису	+	-
Видалення запису	+	-
Перегляд журналу подій	+	+
Формування звіту	+	+

У практичній реалізації комплекс складається з RFID-зчитувача RC522, мікроконтролера ESP32, RFID-міток, програмного модуля обробки UID та бази даних інвентаризації. Після піднесення мітки до зчитувача система отримує її унікальний ідентифікатор, передає його до програмної частини та автоматично виконує пошук відповідного запису. Якщо об’єкт уже зареєстрований, користувач бачить його картку з основною інформацією; якщо мітка відсутня в базі, інтерфейс дає змогу створити новий інвентаризаційний запис. Реальний вигляд розробленого пристрою доцільно подати окремим рисунком, оскільки він підтверджує практичну реалізацію запропонованої архітектури та демонструє взаємодію апаратних компонентів комплексу з програмним інтерфейсом користувача.

3.6 Тестування та оцінка ефективності розробленого рішення

Тестування програмно-апаратного (рис. 3.8, рис. 3.9) комплексу є завершальним етапом розробки, який дає змогу перевірити правильність роботи апаратної частини, програмного забезпечення, бази даних та інтерфейсу користувача. Основна мета тестування полягає у підтвердженні того, що система коректно зчитує RFID-мітки, передає UID до програмного модуля, виконує пошук у базі даних, відображає інформацію про об'єкт і фіксує події у журналі.

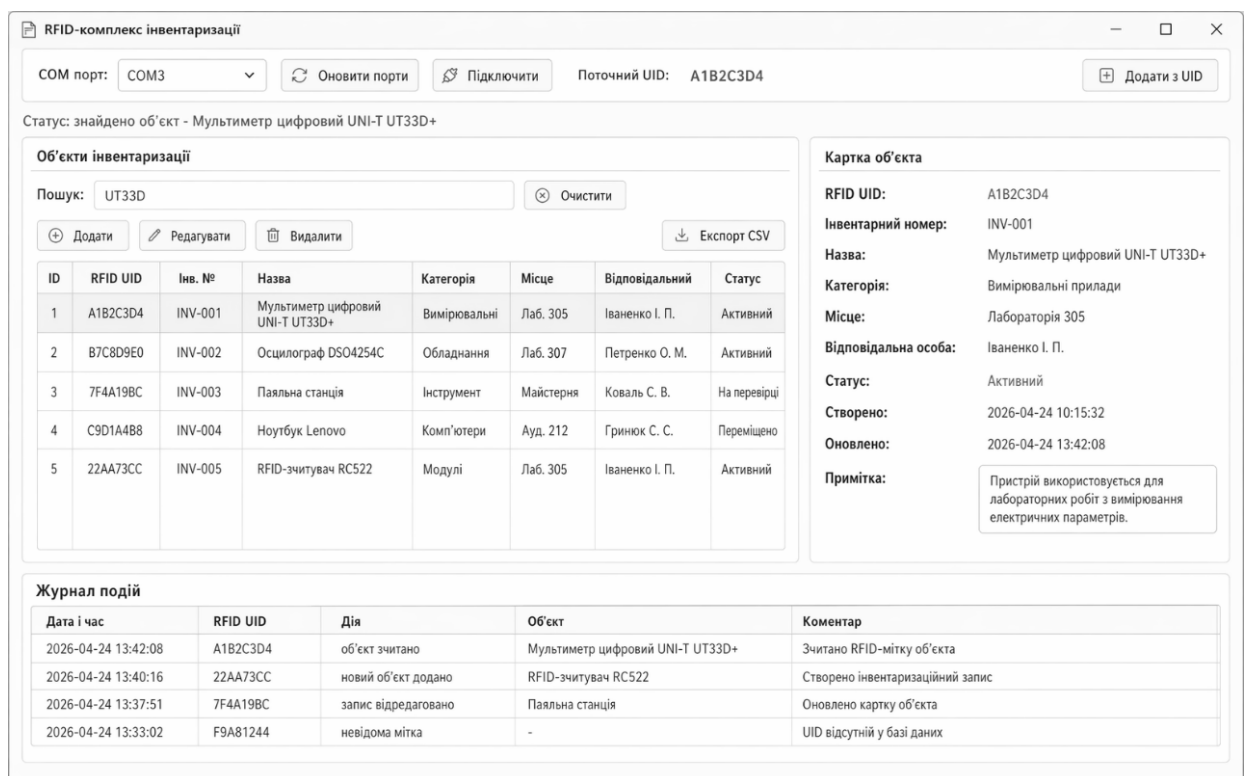


Рисунок 3.8 – Головне вікно програмного рішення

Тестування доцільно проводити за кількома напрямками: перевірка апаратної частини, перевірка програмної логіки, тестування бази даних, перевірка інтерфейсу користувача та оцінка ефективності роботи системи порівняно з ручною інвентаризацією. Такий підхід дає змогу комплексно оцінити працездатність розробленого рішення.

Для перевірки роботи комплексу було сформовано набір тестових сценаріїв, які охоплюють основні функції системи. До них належать зчитування зареєстрованої мітки, зчитування нової мітки, додавання об'єкта, пошук запису, редагування інформації та формування звіту.

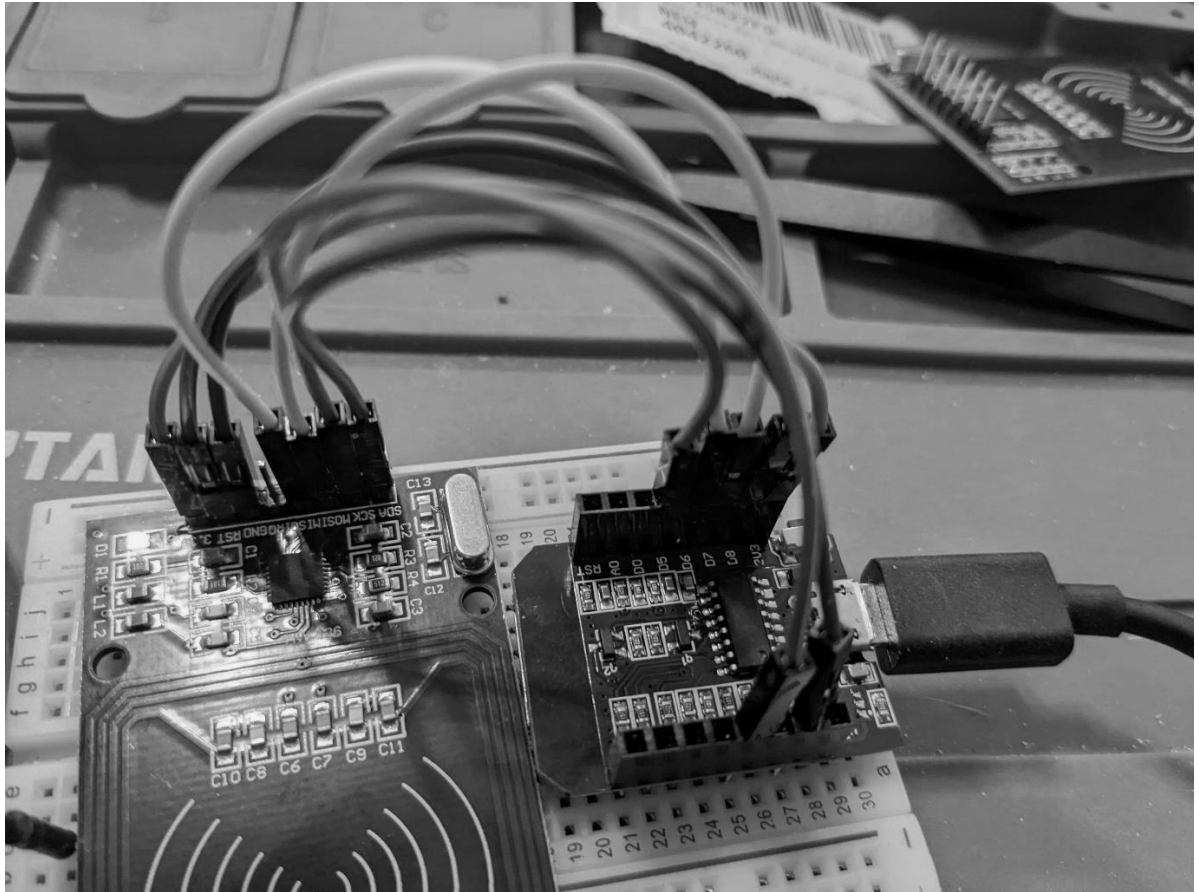


Рисунок 3.9 – Апаратна реалізація

Перед виконанням тестування було створено тестову базу даних, у якій попередньо зареєстровано кілька об'єктів інвентаризації. Кожному об'єкту було присвоєно окремий RFID UID, інвентарний номер, назву, категорію, місце розташування та відповідальну особу.

Як видно з таблиці 3.8, основні функції комплексу працюють відповідно до очікуваної логіки. Система коректно визначає, чи зареєстрована RFID-мітка в базі даних, дає змогу додавати нові записи, оновлювати інформацію про об'єкти та зберігати історію виконаних дій.

Таблиця 3.8 – Тестові сценарії перевірки роботи RFID-комплексу

№	Тестовий сценарій	Очікуваний результат	Фактичний результат
1	Зчитування зареєстрованої RFID-мітки	Відображення картки об'єкта	Дані об'єкта відображено
2	Зчитування незареєстрованої RFID-мітки	Повідомлення про відсутність запису	Система запропонувала додати об'єкт
3	Додавання нового об'єкта	Створення запису в базі даних	Запис успішно створено
4	Пошук за інвентарним номером	Відображення потрібного об'єкта	Об'єкт знайдено
5	Редагування місця розташування	Оновлення запису в базі даних	Дані оновлено
6	Запис події до журналу	Фіксація дати, часу та дії	Подію збережено
7	Формування звіту	Виведення переліку об'єктів	Звіт сформовано

Для оцінки ефективності розробленого рішення доцільно порівняти ручний спосіб інвентаризації та інвентаризацію з використанням RFID-комплексу. Основними критеріями порівняння є швидкість виконання операцій, імовірність помилок, зручність пошуку, автоматичне збереження даних і можливість формування звітів. (таблиця 3.9)

Таблиця 3.9 – Порівняння ручної інвентаризації та RFID-комплексу

Критерій	Ручна інвентаризація	RFID-комплекс
Спосіб ідентифікації	Візуальна перевірка номера	Зчитування RFID UID
Швидкість перевірки	Низька або середня	Вища
Ризик помилки	Високий через людський фактор	Нижчий завдяки автоматизації
Пошук об'єкта	Ручний перегляд записів	Автоматичний пошук у базі
Збереження результатів	Паперовий журнал або таблиця	База даних
Журнал подій	Ведеться вручну	Формується автоматично
Формування звітів	Потребує додаткового часу	Виконується програмно

Для кількісної оцінки ефективності можна використати математичну модель часу інвентаризації. Загальний час ручної інвентаризації визначимо як:

$$T_{\text{руч}} = n \times t_{\text{руч}},$$

де $T_{\text{руч}}$ – загальний час ручної інвентаризації; n – кількість об'єктів; $t_{\text{руч}}$ – середній час перевірки одного об'єкта вручну.

Загальний час RFID-інвентаризації визначимо як:

$$T_{\text{RFID}} = n \times t_{\text{RFID}},$$

де T_{RFID} – загальний час інвентаризації з використанням RFID; t_{RFID} – середній час зчитування та обробки однієї RFID-мітки.

Коефіцієнт ефективності за часом можна подати так:

$$K = T_{\text{руч}} / T_{\text{RFID}}.$$

Якщо $K > 1$, то використання RFID-комплексу є ефективнішим за ручну інвентаризацію. Наприклад, якщо ручна перевірка одного об'єкта займає 30 секунд, а RFID-зчитування з обробкою - 5 секунд, то для 100 об'єктів отримаємо:

$$T_{\text{руч}} = 100 \times 30 = 3000 \text{ с},$$

$$T_{\text{RFID}} = 100 \times 5 = 500 \text{ с},$$

$$K = 3000 / 500 = 6.$$

Це означає, що RFID-інвентаризація у наведеному прикладі може бути приблизно у 6 разів швидшою за ручну перевірку.

Окрім часу, важливим показником є зменшення кількості помилок. Імовірність помилки під час ручної інвентаризації можна позначити як $P_{\text{руч}}$, а під час RFID-інвентаризації – як P_{RFID} . За умови коректного зчитування UID і правильної структури бази даних має виконуватися умова:

$$P_{\text{RFID}} < P_{\text{руч}}.$$

Це пояснюється тим, що система автоматично отримує RFID-код і виконує пошук у базі даних, тоді як під час ручного обліку працівник може помилитися при введенні номера, назви або місця розташування об'єкта.

Узагальнену оцінку результатів тестування подано в таблиці 3.10.

Таблиця 3.10 – Оцінка ефективності розробленого RFID-комплексу

Показник	Результат оцінювання
Зчитування RFID-міток	Виконується коректно
Пошук у базі даних	Працює за RFID UID та інвентарним номером
Додавання нових об'єктів	Реалізовано
Журналювання подій	Реалізовано
Зменшення часу інвентаризації	Досягається за рахунок автоматичного зчитування
Зменшення помилок	Досягається за рахунок уникнення ручного введення UID
Формування звітів	Підтримується програмним модулем
Можливість розширення	Передбачена за рахунок модульної архітектури

Результати тестування показали, що розроблений програмно-апаратний комплекс виконує основні функції, необхідні для автоматизованої інвентаризації. Система забезпечує зчитування RFID-міток, пошук відповідних записів у базі даних, додавання нових об'єктів, ведення журналу подій і формування звітної інформації. Порівняння з ручною інвентаризацією підтверджує, що використання RFID-комплексу дає змогу скоротити час обліку, зменшити кількість помилок і підвищити зручність роботи з інвентаризаційними даними.

ВИСНОВКИ

У кваліфікаційній роботі було розглянуто питання розробки програмно-апаратного комплексу для інвентаризації з використанням RFID-міток. У ході виконання роботи було досягнуто поставленої мети, яка полягала у розробці рішення для автоматизованого обліку матеріальних об'єктів на основі RFID-технології, з можливістю зчитування унікальних ідентифікаторів, обробки отриманих даних, їх збереження в базі даних та відображення користувачу через програмний інтерфейс.

У першому розділі було виконано аналітичне дослідження предметної області. Зокрема, проаналізовано проблему інвентаризації матеріальних об'єктів і встановлено, що традиційні способи обліку, які ґрунтуються на ручному введенні даних, паперових документах або електронних таблицях, мають низку недоліків. До них належать значні витрати часу, залежність від людського фактора, імовірність помилок, складність оперативного оновлення інформації та обмежені можливості швидкого пошуку об'єктів. Це підтвердило доцільність використання автоматизованих засобів ідентифікації.

Також було розглянуто сучасні технології автоматичної ідентифікації, зокрема штрихкоди, QR-коди, NFC та RFID. У результаті порівняння встановлено, що RFID є найбільш придатною технологією для розроблюваного комплексу, оскільки забезпечує безконтактне зчитування, можливість зв'язку фізичного об'єкта з електронним записом у базі даних, скорочення часу інвентаризації та зменшення кількості помилок. Окремо було описано принцип роботи RFID-технології, склад типових RFID-систем, види міток і особливості використання різних частотних діапазонів.

У межах аналітичної частини також було досліджено існуючі RFID-рішення для інвентаризації. Було встановлено, що такі системи можуть реалізовуватися як прості локальні прототипи на базі Arduino, ESP або NodeMCU, а також як складніші рішення з інтеграцією IoT, хмарних платформ,

ERP-систем і засобів аналітики. На основі цього було сформовано основні вимоги до програмно-апаратного комплексу: зчитування RFID-міток, збереження інформації в базі даних, пошук об'єктів, ведення журналу подій, формування звітів, забезпечення базового рівня інформаційної безпеки та можливість подальшого розширення системи.

У другому розділі було обґрунтовано програмно-апаратні рішення для побудови RFID-комплексу. Було запропоновано модульну архітектуру системи, яка включає RFID-мітку, RFID-зчитувач, мікроконтролерну платформу, програмний модуль, базу даних, інтерфейс користувача та журнал подій. Такий підхід дає змогу розділити систему на окремі функціональні частини, спростити її розробку та забезпечити можливість подальшого вдосконалення.

Було виконано вибір основних апаратних компонентів системи. Для зчитування RFID-міток обґрунтовано використання модуля RC522, який працює на частоті 13,56 MHz, має доступну вартість, підтримує SPI-інтерфейс і може використовуватися у навчальних та демонстраційних проєктах. Як RFID-носії запропоновано використовувати пасивні картки або брелоки, що не потребують власного джерела живлення та є достатніми для реалізації прототипу системи інвентаризації.

Окрему увагу було приділено вибору мікроконтролерної платформи. Було порівняно Arduino UNO, NodeMCU ESP8266 та ESP32. У результаті аналізу найбільш доцільним варіантом визначено ESP32, оскільки ця платформа має вбудовані засоби бездротового зв'язку, достатню продуктивність, підтримує необхідні інтерфейси та може бути використана як для локальної, так і для мережевої реалізації комплексу.

Було спроектовано програмну архітектуру системи. Вона передбачає наявність модуля приймання RFID-коду, модуля обробки даних, модуля взаємодії з базою даних, інтерфейсу користувача, журналу подій і модуля формування звітів. Така структура забезпечує повний цикл роботи з інвентаризаційними

даними: від зчитування RFID-мітки до відображення інформації про об'єкт і фіксації події у журналі.

У роботі було обґрунтовано вибір бази даних для збереження інвентаризаційних записів. Для прототипу запропоновано використовувати SQLite, оскільки ця база даних не потребує окремого сервера, є простою в налаштуванні, підтримує основні операції з даними та добре підходить для локальної системи. Було визначено основні таблиці бази даних: об'єкти інвентаризації, категорії, місця розташування, користувачі та журнал подій. Також було враховано потребу в унікальності RFID-коду та інвентарного номера.

У другому розділі також було розглянуто питання інформаційної безпеки RFID-системи. Було визначено основні загрози, серед яких несанкціоноване зчитування міток, зміна записів у базі даних, втрата даних, помилки користувачів і несанкціонований доступ до програмного інтерфейсу. Для їх зменшення запропоновано використовувати авторизацію користувачів, розмежування прав доступу, журналювання дій, резервне копіювання бази даних і перевірку унікальності RFID-кодів.

У третьому розділі було виконано практичне проектування програмно-апаратного комплексу. Було розроблено структурну схему системи, яка відображає послідовність проходження даних від RFID-мітки до бази даних та інтерфейсу користувача. Запропонована схема демонструє логіку роботи комплексу: RFID-мітка ідентифікує об'єкт, зчитувач отримує її UID, мікроконтролер передає дані до програмного модуля, а база даних забезпечує пошук і збереження інформації.

Було описано реалізацію апаратної частини системи. Зокрема, розглянуто підключення RFID-зчитувача RC522 до ESP32 через SPI-інтерфейс, наведено призначення основних контактів і пояснено логіку передавання UID від мітки до мікроконтролера. Це дало змогу сформулювати основу для практичної реалізації пристрою зчитування RFID-міток.

Було розроблено алгоритм роботи RFID-комплексу. Алгоритм включає запуск системи, ініціалізацію мікроконтролера та RFID-зчитувача, очікування мітки, зчитування UID, передавання даних до програмного модуля, пошук запису в базі даних, відображення інформації користувачу, створення нового запису у разі відсутності мітки в базі та запис події до журналу. Для формалізації роботи системи було використано математичні моделі відповідності між RFID-мітками та об'єктами, а також моделі оцінювання часу інвентаризації.

Також було спроектовано базу даних інвентаризації. Визначено структуру основних таблиць, їхні поля та зв'язки між ними. Особливу увагу приділено таблиці об'єктів інвентаризації та таблиці журналу подій, оскільки саме вони забезпечують основну функціональність системи. Запропонована модель бази даних дає змогу зберігати інформацію про об'єкти, RFID-коди, інвентарні номери, категорії, місця розташування, відповідальних осіб і події, що відбуваються в системі.

Було розроблено структуру програмного інтерфейсу користувача. Передбачено головне вікно системи, список об'єктів, поле пошуку, картку об'єкта, форму додавання нового запису, форму редагування, журнал подій і модуль формування звітів. Запропонований інтерфейс забезпечує зручну роботу з інвентаризаційними записами та дає змогу швидко знаходити об'єкти за RFID-кодом, інвентарним номером або назвою.

На завершальному етапі було проведено тестування та оцінку ефективності розробленого рішення. Було перевірено зчитування зареєстрованих і незареєстрованих RFID-міток, додавання нових об'єктів, пошук записів, редагування інформації, запис подій до журналу та формування звітів. Результати тестування підтвердили, що запропонований комплекс виконує основні функції, необхідні для автоматизованої інвентаризації.

Для оцінки ефективності було порівняно ручну інвентаризацію та RFID-комплекс. Встановлено, що використання RFID дає змогу скоротити час перевірки об'єктів, зменшити кількість помилок, автоматизувати збереження

результатів, спростити пошук інформації та забезпечити формування звітів. Математична модель оцінювання часу показала, що за умови зменшення часу обробки одного об'єкта RFID-система може суттєво підвищити швидкість інвентаризації порівняно з ручним способом.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Zhang Y. Digital transformations of supply chain management via RFID technology: a systematic literature review / Y. Zhang, Y. Lin, A. Esfahbodi // *Journal of Digital Economy*. 2025. Vol. 4. P. 251-267. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2773067025000196> (дата звернення: 20.02.2026).
2. Budiyanto A. Optimizing Inventory Systems with RFID: A Narrative Review of Integration, Efficiency, and Barriers / A. Budiyanto, M. Muslim // *Sinergi International Journal of Logistics*. 2024. Vol. 2, No. 2. P. 133-146. DOI: <https://doi.org/10.61194/sijl.v2i2.621>.
3. Kathiriya A. A Review of RFID Technology's Impact on Inventory Management and Supply Chain Optimization / A. Kathiriya // *International Journal of Emerging Research in Engineering and Technology*. 2025. Vol. 6, No. 3. P. 86-94. DOI: <https://doi.org/10.63282/3050-922X.IJERET-V6I3P110>.
4. Tan Y. Research on the Optimization of Inventory Management Through Radio Frequency Identification Technology / Y. Tan, H. Yin, Z. Yin, J. Zhang // *Advances in Economics, Management and Political Sciences*. 2025. Vol. 147, No. 1. P. 116-122. DOI: <https://doi.org/10.54254/2754-1169/2024.GA19139>.
5. Poojary A. RFID Application to Improve Inventory Management / A. Poojary, R. S. Kumar // *International Journal of Management & Business Studies*. Vol. 4, Issue 4. P. 29-33. URL: <https://www.ijmbs.com/Vol4.4/vol4.4/5-Anand-Poojary.pdf> (дата звернення: 25.12.2025).
6. Yusof M. K. The Adoption and Implementation of RFID: A Literature Survey / M. K. Yusof, M. Y. Saman // *LIBRES: Library and Information Science Research Electronic Journal*. Vol. 26, No. 1. P. 31-52. DOI: <https://doi.org/10.32655/LIBRES.2016.1.3>.
7. Study of RFID Technology for Warehouse Traceability in the Company FRUMECAR / A. Guerrero González, M. J. Pedreño Roca, P. J. Ayala Bernal.

Preprints.org. 2024. URL: <https://www.preprints.org/manuscript/202401.2101> (дата звернення: 10.01.2026).

8. Lou A. RFID-Technologies in Warehousing: State-of-the Art and Future Perspectives / A. Lou, N. Schiemer, M. Schmücker, P. Schöttl, D. V. Zaki, M. Woschank // Proceedings of the International Conference on Industrial Engineering and Operations Management. 2024. DOI: <https://doi.org/10.46254/AF05.20240239>.

9. Application Analysis of RFID in Supply Chain Management. URL: <https://pdfs.semanticscholar.org/2110/b0949f4c480ddfb192574679b19dc66b3b10.pdf> (дата звернення: 05.02.2026).

10. IoT-Enabled RFID in Supply Chain Management / Journal of Computer and Communications. 2024. URL: https://www.scirp.org/pdf/jcc20241211_151732964.pdf (дата звернення: 25.12.2025).

11. Benjamin M. Enhancing Real-Time Inventory Tracking and Management in Warehouses Using IoT-Integrated RFID Systems and Cloud Platforms / M. Benjamin. 2025. URL: https://www.researchgate.net/publication/388075712_Enhancing_Real-Time_Inventory_Tracking_and_Management_in_Warehouses_Using_IoT-Integrated_RFID_Systems_and_Cloud_Platforms (дата звернення: 05.03.2026).

12. Henaïen A. RFID IoT Architecture for Smart Inventory Management: Security Integration / A. Henaïen, H. Ben Elhadj, L. Chaari Fourati // 2024 International Wireless Communications and Mobile Computing. 2024. P. 1010-1015. DOI: <https://doi.org/10.1109/IWCMC61514.2024.10592487>.

13. Pontoh G. T. A Systematic Literature Review of ERP and RFID Implementation in Supply Chain Management / G. T. Pontoh, A. Indrijawati, F. Selvi, L. Ningsih, D. R. Putri // WSB Journal of Business and Finance. 2024. Vol. 58, No. 1. P. 80-96. DOI: <https://doi.org/10.2478/wsbjbf-2024-0009>.

14. Crooks K. Using Radio Frequency Identification (RFID) Technology in the Pharmaceutical Supply Chain: The Impact on Competitive Advantage / K. Crooks, A. Haddud // Sustainability. 2025. Vol. 17, No. 4. Article 1378. DOI: <https://doi.org/10.3390/su17041378>.

15. Chen Y. Optimization of the Intelligent Asset Management System Based on WSN and RFID Technology / Y. Chen, G. Chen // Journal of Sensors. 2022. Vol. 2022. Article ID 3436530. P. 1-11. DOI: <https://doi.org/10.1155/2022/3436530>.

16. Desky H. The Application of New RFID System in Logistics Warehousing Management - Taking the Automobile Industry as an Example / H. Desky, E. Satria, Sarwan, M. I. Sholeh, N. Gunantara // Power System Technology. 2024. Vol. 48, Issue 1. P. 1113-1134. URL: <https://powertechjournal.com/index.php/journal/article/view/375/303> (дата звернення: 28.12.2025).

17. Shehab W. A. RFID-Based Inventory and Security System / W. A. Shehab, G. Al-Shabaan, W. Al-Sawalmeh // Innovative Systems Design and Engineering. Vol. 6, No. 10. P. 53-60. URL: <https://www.iiste.org/Journals/index.php/ISDE/article/view/26416/27060> (дата звернення: 28.12.2025).

18. Cloud-Connected RFID Inventory Management System Using NodeMCU // International Journal of Innovative Research in Technology. 2025. Vol. 11, Issue 11. P. 4424-4428. URL: https://ijirt.org/publishedpaper/IJIRT175986_PAPER.pdf (дата звернення: 24.03.2026).

19. RFID-Based Inventory Management System // International Journal for Research in Applied Science & Engineering Technology. - URL: <https://www.ijraset.com/research-paper/rfid-based-inventory-management-system> (дата звернення: 24.03.2026).

20. Bandara I. Optimizing Efficiency Using a Low-Cost RFID-Based Lab Inventory Management System / I. Bandara. University of Hertfordshire Research Archive. 2024. URL: https://uhra.herts.ac.uk/id/eprint/14519/1/RFID_Lab_Inventory_Management_system_publication_Accepted.pdf (дата звернення: 28.12.2025).

21. Arduino IoT Based Inventory Management System Using NodeMCU and RFID. URL: <https://pdfs.semanticscholar.org/ec2e/ee174c2989345fc89fff8e2385e34eaf2416.pdf> (дата звернення: 24.04.2026).

22. Fernández-Caramés T. M. Towards an Autonomous Industry 4.0 Warehouse: A UAV and Blockchain-Based System for Inventory and Traceability Applications in Big Data-Driven Supply Chain Management / T. M. Fernández-Caramés, O. Blanco-Novoa, I. Froiz-Míguez, P. Fraga-Lamas // Sensors. Vol. 19, No. 10. Article 2394. DOI: <https://doi.org/10.3390/s19102394>.

23. Setting Up a UHF RFID Inventory System: Hardware, Software and Tips. RFID Label. 2024. URL: <https://www.rfidlabel.com/setting-up-a-uhf-rfid-inventory-system-hardware-software-and-tips> (дата звернення: 24.04.2026).