

**ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
ІНФОРМАЦІЙНО-КОМУНІКАЦІЙНИХ ТЕХНОЛОГІЙ
НАВЧАЛЬНО-НАУКОВИЙ ІНСТИТУТ ІНФОРМАЦІЙНИХ ТЕХНОЛОГІЙ
КАФЕДРА ІНФОРМАЦІЙНИХ СИСТЕМ ТА ТЕХНОЛОГІЙ**

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

на тему: «Система електронних цінників на основі ESP-32 H2 з
інтеграцією в базу даних»

на здобуття освітнього ступеня бакалавра

зі спеціальності 126 Інформаційні системи та технології

(код, найменування спеціальності)

освітньо-професійної програми Інформаційні системи та технології

(назва)

*Кваліфікаційна робота містить результати власних досліджень.
Використання ідей, результатів і текстів інших авторів мають посилання на
відповідне джерело*

(підпис)

Олександр КАВУН

Ім'я, ПРІЗВИЩЕ здобувача

Виконав:

здобувач вищої освіти гр. ІСД-42

Олександр КАВУН

Ім'я, ПРІЗВИЩЕ

Керівник:

*науковий ступінь,
вчене звання*

Олег СЕНЬКОВ, к. т. н.

Ім'я, ПРІЗВИЩЕ

Рецензент:

*науковий ступінь,
вчене звання*

Ім'я, ПРІЗВИЩЕ

Київ 2025

**ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
ІНФОРМАЦІЙНО-КОМУНІКАЦІЙНИХ ТЕХНОЛОГІЙ**

Навчально-науковий інститут Інформаційних технологій

Кафедра Інформаційних систем та технологій

Ступінь вищої освіти Бакалавр

Спеціальність 126 Інформаційні системи та технології

Освітньо-професійна програма Інформаційні системи та технології

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедру Каміла СТОРЧАК
(Ім'я, ПРІЗВИЩЕ)

«___» _____ 20__ р.

ЗАВДАННЯ НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ

Кавун Олександр Миколайович

(прізвище, ім'я, по батькові здобувача)

1. Тема кваліфікаційної роботи: Система електронних цінників на основі

Система електронних цінників на основі ESP-32 H2 з інтеграцією в базу даних
керівник кваліфікаційної роботи Олег СЕНЬКОВ, к. т. н.

(Ім'я, ПРІЗВИЩЕ, науковий ступінь, вчене звання)

затверджені наказом Державного університету інформаційно-комунікаційних
технологій від «24» лютого 2025 р. № 56

2. Строк подання кваліфікаційної роботи «30» травня 2025 р.

3. Вихідні дані до кваліфікаційної роботи: офіційна технічна документація ESP,
інструментів програмної розробки та апаратних складових, результати наукових
досліджень про технології діджиталізації комерційних та бізнес-процесів, кейси
використання баз даних для програмних рішень для бізнесу.

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

1. Аналіз існуючих систем електронних цінників у бізнес-процесах

2. Проектування апаратної частини системи електронних цінників

3. Розробка програмного забезпечення та тестування створеної системи

5. Перелік ілюстративного матеріалу: презентація

6. Дата видачі завдання «24» лютого 2025 р.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів кваліфікаційної роботи	Строк виконання етапів роботи	Примітка
1	Підбір науково-технічної літератури	01.03.2025 р.	
2	Дослідження існуючих систем управління електронними цінниками та огляд їх технологічних особливостей	15.03.2025 р.	
3	Формулювання технічного завдання, функціональних та нефункціональних вимог на розробку системи електронних цінників	17.03.2025 р.	
4	Вибір технологічного стеку та проектування архітектури і монтажної схеми системи електронних цінників	4.04.2025 р.	
5	Реалізація та тестування програмного забезпечення інформаційної системи електронних цінників	16.05.2025 р.	
6	Розробка демонстраційних матеріалів	26.05.2025 р.	
7	Попередній захист дипломної роботи	27.05.2025 р.	
8	Подання роботи в деканат	30.05.2025 р.	

Здобувач вищої освіти

Олександр КАВУН

(підпис)

(Ім'я, ПРІЗВИЩЕ)

Керівник кваліфікаційної роботи

Олег СЕНЬКОВ

(підпис)

(Ім'я, ПРІЗВИЩЕ)

РЕФЕРАТ

Текстова частина кваліфікаційної роботи на здобуття освітнього ступеня бакалавра: 51 стор., 29 рис., 4 табл., 23 джерело.

Мета роботи – розробити систему електронних цінників на базі платформи ESP32-H2 з інтеграцією в базу даних для автоматичного дистанційного оновлення цін товарів.

Об'єкт дослідження – процес автоматизації оновлення цін у роздрібній торгівлі.

Предмет дослідження – система електронних цінників, зокрема її апаратна і програмна складові (апаратні засоби на базі ESP32-H2 та програмне забезпечення для бездротового обміну даними з базою даних).

Короткий зміст роботи: Кваліфікаційна робота складається з вступу, трьох розділів, висновків та списку джерел. У першому розділі розглянуто технології електронних ценників та їх застосування для автоматизації зміни цін (E-Ink дисплеї, бездротові IoT-протоколи). Другий розділ присвячений проектуванню системи: вибору мікроконтролера ESP32-H2, розробці схеми пристрою, опису компонентів (дисплей, живлення, Zigbee-модуль). Описано принцип роботи мережі електронних цінників через Zigbee та інтеграцію з базою даних. Третій розділ охоплює програмну частину: розробка прошивки для ESP32-H2 та програмного забезпечення для сервера, що обмінюється даними між базою та мережею. Проведено тестування прототипу системи, аналіз енергоспоживання та оцінка часу автономної роботи. Висновки підсумовують основні результати роботи, технічні характеристики, переваги та напрямки подальших удосконалень.

КЛЮЧОВІ СЛОВА: ЕЛЕКТРОННИЙ ЦІННИК, ESP32-H2, ZIGBEE, БАЗА ДАНИХ, E-INK, ІНТЕРНЕТ РЕЧЕЙ.

ABSTRACT

The text of the bachelor's qualification work contains *51 pages*, *29 figures*, *4 table*, and *23 sources*.

The purpose of the work - is to develop an electronic shelf labeling system based on the ESP32-H2 platform with database integration for automatic remote price updates.

The object of the study is the process of automating price updates in retail.

The subject of the study is the electronic price tag system, particularly its hardware and software components (the ESP32-H2-based device and the software for wireless data exchange with a database).

Summary of the work: The qualification work consists of an introduction, three chapters, conclusions, and references. The first chapter reviews electronic shelf label technologies and their application for automating price changes (E-Ink displays, wireless IoT protocols). The second chapter focuses on system design: selection of the ESP32-H2 microcontroller, device architecture, and components (display, power, Zigbee module). It describes the operation of the electronic price tag network via Zigbee and integration with a database. The third chapter covers software implementation: firmware development for the ESP32-H2 and server-side software for data exchange between the database and the network. The prototype system was tested, energy consumption analyzed, and battery life estimated. Conclusions summarize the main results, technical specifications, advantages, and directions for further improvements.

KEYWORDS: ELECTRONIC PRICE TAG, ESP32-H2, ZIGBEE, DATABASE, E-INK, INTERNET OF THINGS.

ЗМІСТ

ВСТУП.....	9
1 ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ ТА АНАЛІЗ СИСТЕМ ЕЛЕКТРОННИХ ЦІННИКІВ	13
1.1 Актуальність автоматизації процесів у роздрібній торгівлі	13
1.2 Аналіз існуючих технологій електронних цінників	16
1.3 Технічний огляд мікроконтролера ESP32-N2 для розробки IoT-рішень	27
2 ПРОЄКТУВАННЯ АПАРАТНОЇ ЧАСТИНИ СИСТЕМИ.....	31
2.1. Вимоги до побудови системи електронних цінників	31
2.2. Вибір і обґрунтування апаратних компонентів.....	32
2.3 Розробка схеми підключення електронного цінника	42
3 РОЗРОБКА ПРОГРАМНОГО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ТА ТЕСТУВАННЯ.....	45
3.1. Алгоритм роботи програмного забезпечення	45
3.2. Взаємодія з базою даних та оновлення інформації на цінниках	49
3.3 Методика тестування та оцінка результатів.....	53
ВИСНОВКИ.....	58
ПЕРЕЛІК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	60
ДЕМОНСТРАЦІЙНІ МАТЕРІАЛИ (Презентація).....	64

ВСТУП

Актуальність теми. Сучасна роздрібна торгівля потребує швидкого та точного оновлення цін на товари, що особливо актуально за умов частих акцій, змін курсів валют чи динамічного ціноутворення. Традиційне ручне перемаркування паперових цінників є трудомістким і схильним до помилок процесом. Невідповідність між ціною на полиці магазину та даними в інформаційній системі підприємства може призводити до фінансових втрат і погіршення репутації. Тому впровадження електронних цінників на основі IoT (Internet of Things, інтернету речей) є актуальним напрямом автоматизації торгівлі. Електронні ценники (Electronic Shelf Labels, ESL) вже стали світовим трендом: вони масово використовуються в супермаркетах і магазинах Європи та Америки, а останнім часом впроваджуються і в Україні (наприклад, у мережі «Сільпо» та інших). До переваг ESL належать економія ресурсів (паперу, часу персоналу), оперативне й точне централізоване управління цінами, зниження ризику людських помилок і можливість синхронізації цін між онлайн- та офлайн-каналами. За даними галузевих досліджень, використання електронних цінників дозволяє оновлювати ціни автоматично в режимі реального часу по всій торговій точці, фактично усуваючи багатоденні цикли ручного переоцінювання товарів. Для реалізації системи електронних цінників важливим є вибір технологій, які забезпечать енергоефективність та надійність роботи численних пристроїв. У пропонованому рішенні використано бездротовий протокол Zigbee замість Wi-Fi, оскільки Zigbee утворює більш стабільну mesh-мережу та характеризується низьким енергоспоживанням. Електронні цінники з Zigbee можуть більшу частину часу перебувати в режимі сну і працювати роками від однієї батареї тоді як при використанні Wi-Fi батарейки довелося б міняти щотижня. Відображення цін здійснюється за допомогою e-ink дисплея (технології “електронного паперу”), що споживає енергію лише під час оновлення зображення, забезпечуючи високий рівень енергоефективності та чіткість зображення під будь-яким кутом огляду. Центральне зберігання та управління даними цін реалізовано в базі даних MySQL, що дозволяє інтегрувати систему цінників з обліковою системою магазину та

існуючим програмним забезпеченням для управління товарами. Інтеграція програмного забезпечення електронних цінників з бекендом (базою даних) є необхідною умовою для узгодженості інформації про ціни в масштабах підприємства. Таким чином, розробка апаратно-програмного комплексу електронних цінників з використанням ESP32-H2, Zigbee, e-ink та MySQL є актуальною задачею, що відповідає сучасним тенденціям впровадження IoT-рішень у сфері автоматизації роздрібної торгівлі. Запропонована в межах бакалаврської роботи система, хоча і має демонстраційний характер, відтворює реальні сценарії використання IoT-технологій у торговельній галузі, що підкреслює практичну значущість і новизну теми.

Мета дослідження. Метою дослідження є розробка апаратно-програмного комплексу електронних цінників на базі мікроконтролера ESP32-H2 з Zigbee-зв'язком та e-ink дисплеєм, інтегрованого з базою даних MySQL, для автоматизації процесу оновлення цін у роздрібній торгівлі. Досягнення поставленої мети передбачає створення діючого прототипу системи та перевірку його працездатності в наближених до реальних умовах.

Об'єкт дослідження – процеси та засоби автоматизації оновлення цін у роздрібній торгівлі на основі технологій інтернету речей.

Предмет дослідження – апаратно-програмна система електронних цінників, що включає мікроконтролер ESP32-H2 з модулем Zigbee і e-ink дисплеєм, а також інтеграцію цієї системи з базою даних MySQL для централізованого керування ціновою інформацією.

Завдання дослідження. Для досягнення зазначеної мети у ході роботи необхідно вирішити такі основні завдання:

- Проаналізувати сучасний стан проблеми та існуючі рішення щодо електронних цінників і застосування IoT-технологій у сфері роздрібної торгівлі.
- Дослідити можливості та характеристики обраних технічних засобів – мікроконтролера ESP32-H2, бездротового протоколу Zigbee та технології електронного паперу e-ink – з точки зору їх використання в системі електронних цінників.

- Розробити архітектуру апаратно-програмного комплексу електронних цінників, включаючи структуру Zigbee-мережі для обміну даними між цінниками та центральним вузлом, а також схему інтеграції з базою даних MySQL.
- Реалізувати програмне забезпечення прототипу: розробити прошивку для ESP32-H2, що забезпечує прийом даних цін через Zigbee та відображення їх на e-ink дисплеї, і серверну частину, що здійснює зберігання та оновлення даних цін у базі MySQL і передавання оновлень на цінники.
- Провести випробування створеного прототипу в умовах, наближених до реальних (імітація роботи магазину), перевірити коректність і своєчасність оновлення цін на дисплеях та стабільність мережевого зв'язку, проаналізувати результати тестування і визначити шляхи подальшого вдосконалення системи.

Методи дослідження. Для розв'язання поставлених завдань використано комплекс загальнонаукових та спеціальних методів дослідження. Зокрема, застосовано методи аналізу і синтезу – при вивченні літературних джерел, нормативних документів та існуючих технічних рішень у галузі IoT і торговельних інформаційних систем; системний підхід та метод структурного проєктування – при розробці архітектури апаратно-програмного комплексу електронних цінників і моделюванні його компонентів; методи прототипування та експерименту – на етапі практичної реалізації системи та проведення її тестування; а також елементи структурного аналізу даних – при проєктуванні схеми бази даних MySQL і забезпеченні інтеграції з нею. Такий підбір методів дозволив всебічно дослідити поставлену проблему та досягти мети роботи.

Галузь застосування результатів. Результати даної роботи можуть бути впроваджені в практику автоматизації процесів роздрібної торгівлі. Розроблений апаратно-програмний комплекс електронних цінників може слугувати основою для створення промислових систем управління цінами у магазинах і супермаркетах. Зокрема, технології та підходи, реалізовані в проєкті, можуть бути використані при побудові комерційних ESL-систем, що інтегруються з існуючими обліковими системами підприємств (складськими чи торговельними базами

даних) для автоматичного оновлення та синхронізації цін на товари. Впровадження таких систем дозволить підвищити ефективність управління ціноутворенням, оперативно реагувати на зміни ринкової кон'юнктури та мінімізувати людський фактор при зміні цін. Крім того, створений прототип може бути використаний у навчальних цілях або як демонстраційний проєкт, що ілюструє можливості IoT-технологій у сфері «розумної» торгівлі та слугує відправною точкою для подальших досліджень у напрямі цифрової трансформації торговельних процесів.

Апробація. Основні положення і результати бакалаврської роботи доповідались на:

- VI Міжнародна науково-технічна конференція «Сучасний стан та перспективи розвитку IoT», ДУІКТ, 2025.

1 ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ ТА АНАЛІЗ СИСТЕМ ЕЛЕКТРОННИХ ЦІННИКІВ

1.1 Актуальність автоматизації процесів у роздрібній торгівлі

Сучасна роздрібна торгівля стикається з низкою викликів, зокрема потребою в оптимізації бізнес-процесів, підвищенні ефективності обслуговування клієнтів та зниженні витрат. Традиційні методи управління цінниками, такі як використання паперових носіїв, створюють значні труднощі у масштабних торгових мережах через необхідність регулярного оновлення інформації, витрат часу на ручну заміну та ризики людського фактора. Усе це знижує конкурентоспроможність компаній, які недостатньо уваги приділяють автоматизації процесів. Автоматизація процесів у роздрібній торгівлі сприяє не лише зменшенню операційних витрат, але й підвищенню точності даних, оперативності їх оновлення та покращенню споживчого досвіду. Електронні цінники, інтегровані з базами даних товарів, дозволяють автоматично змінювати вартість продукції в режимі реального часу, що мінімізує затрати праці та ймовірність помилок.

Особливу актуальність автоматизація набуває в умовах посилення екологічних стандартів та вимог до сталого розвитку. Виробництво паперових цінників супроводжується значним негативним впливом на довкілля. Для виготовлення паперової продукції необхідні великі обсяги деревини, води та енергії. Міжнародний журнал перспективних досліджень та огляду провів дослідження, яке показало, що для виробництва паперу щорічно вирубується понад 4 млрд дерев, що становить 35% від загального обсягу зрубаних дерев у світі. Графік зменшення глобальної лісової площі протягом 25 років наведено на рисунку 1.1.

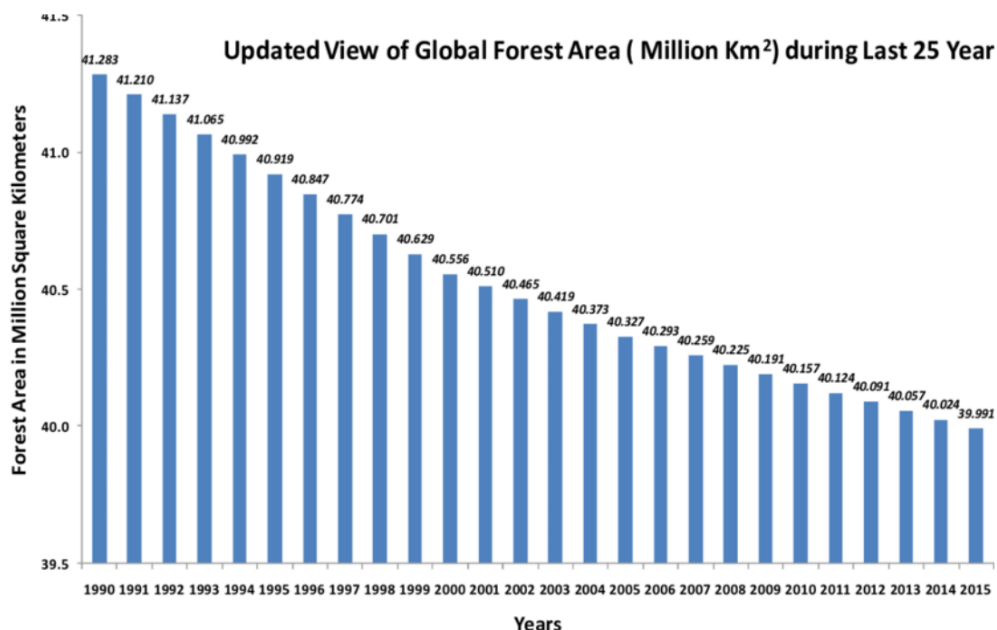
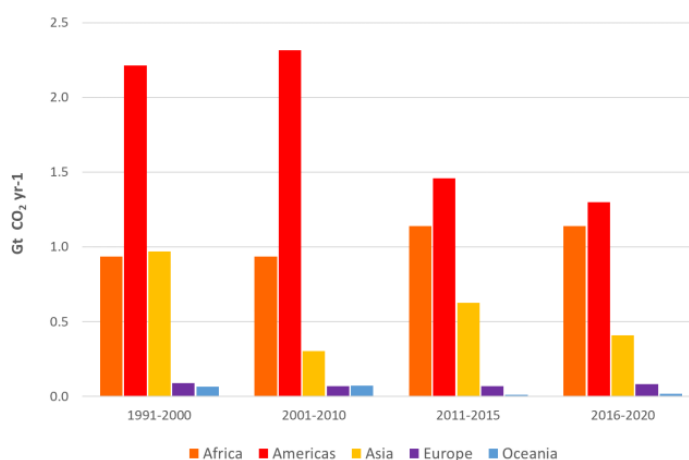


Рис. 1.1 Графік зменшення глобальної лісової площі протягом 25 років[1]

Крім того, Продовольча та сільськогосподарська організація ООН стверджує, що на виробництво 1 тонни паперу використовується до 10 000 літрів води та близько 2,5–3 МВт·год електроенергії. Це сприяє збільшенню загального екологічного навантаження на планету, оскільки виділяється значна кількість парникових газів, зокрема CO₂, що призводить до зміни клімату.

Регіональний розподіл викидів CO₂ від вирубки лісів за період 1990–2020 років показано на рис. 1.2.

Figure 2. Regional distribution of emissions from deforestation, 1990–2020



Source: FAOSTAT, 2020.

Рис. 1.2 Регіональний розподіл викидів CO₂ від вирубки лісів за період 1990–2020 років[2]

Значний вплив має також використання касової стрічки, що виготовляється з термопаперу. Виробництво цієї продукції потребує спеціальної хімічної обробки, зокрема застосування бісфенолу-А (ВРА). Дослідження показали, що ВРА має мультисистемну токсичність, впливаючи на здоров'я як людини, так і тварин. Його розкладання займає десятки років, створюючи довготривалий негативний екологічний вплив. Мультисистемна токсичність ВРА ілюструється на рис. 1.3.

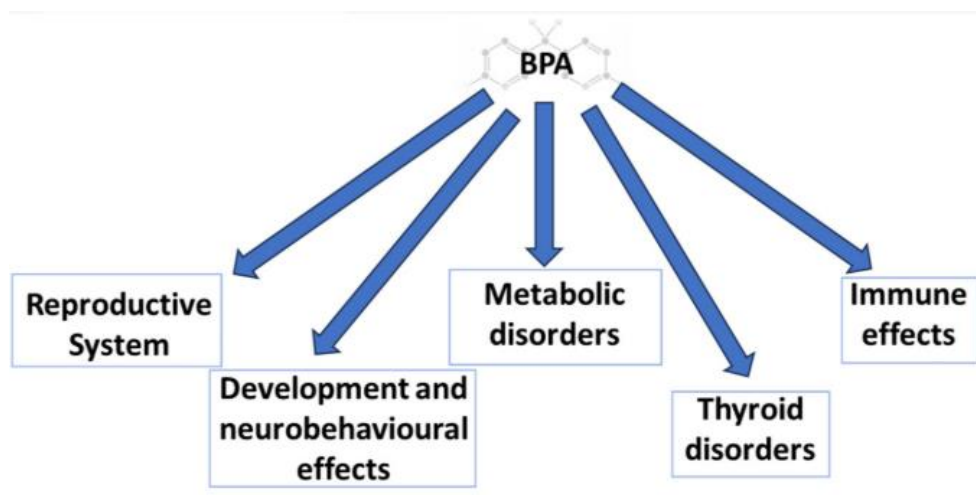


Рис. 1.3 Мультисистемна токсичність ВРА[3]

У таких умовах впровадження електронних систем для маркування товарів постає не лише як спосіб підвищення ефективності бізнесу, але й як необхідний крок для зниження екологічного навантаження. Відмова від паперових цінників сприяє збереженню природних ресурсів, зменшенню обсягів відходів та покращенню умов праці працівників, зокрема завдяки виключенню контакту з потенційно шкідливими матеріалами. За даними McKinsey & Company[4], автоматизація процесів у роздрібній торгівлі може знизити операційні витрати на 20-30%, що робить її економічно вигідною для бізнесу. Крім того, дослідження PwC підкреслює, що автоматизація дозволяє збільшити продуктивність працівників на 40-60%, оскільки вони можуть зосередитися на більш стратегічних завданнях.

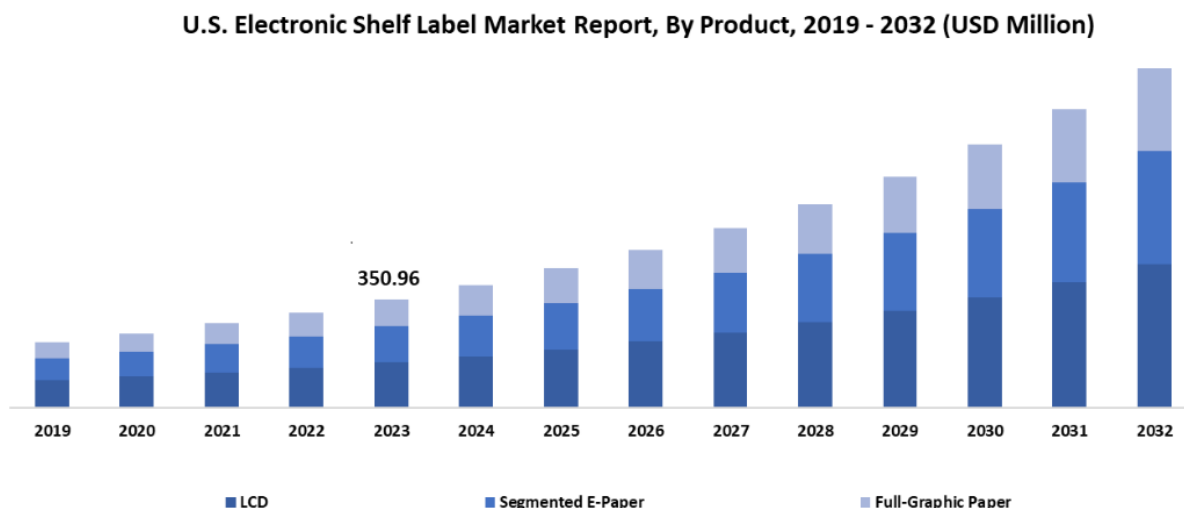
Таким чином, автоматизація процесів у роздрібній торгівлі є стратегічно важливим напрямком розвитку, що дозволяє об'єднати економічну доцільність,

технологічний прогрес та екологічну відповідальність. Впровадження електронних цінників на базі сучасних IoT-технологій стає не лише інструментом підвищення ефективності, але й кроком до сталого розвитку, що відповідає сучасним викликам.

1.2 Аналіз існуючих технологій електронних цінників

Електронні цінники (ESL) — це технологічні системи, які використовуються в роздрібній торгівлі для автоматизованого управління цінами на товари у фізичних магазинах. Обсяг світового ринку електронних етикеток на полицях у 2023 році оцінювався в 1726,63 млн доларів США. Очікується, що ринок зросте з 1959,55 млн доларів США в 2024 році до 5444,35 млн доларів США до 2032 року, показуючи CAGR 13,6% протягом прогнозованого періоду [5].

Електронні цінники базуються на технологіях відображення інформації, серед яких найпоширенішими є дисплеї на основі електронного паперу (ePaper) та рідкокристалічні дисплеї (LCD). На рисунку 1.4 зображено тенденцію використання різних типів дисплею до 2032 року



Source: Polaris Market Research Analysis

Рис. 1.4 Тенденція використання різних типів дисплею до 2032 року [5].

Технологія ePaper імітує читабельність чорнила та паперу, електронний папір поєднує активну матричну TFT технологію, що використовується в РК-дисплеях, з шаром електронного чорнила. Шар чорнила складається з мільйонів крихітних капсул з електрично зарядженими пігментними частинками, що підвішені між прозорим верхнім електродом і нижнім електродом. Побудова дисплею зображена на рис. 1.5

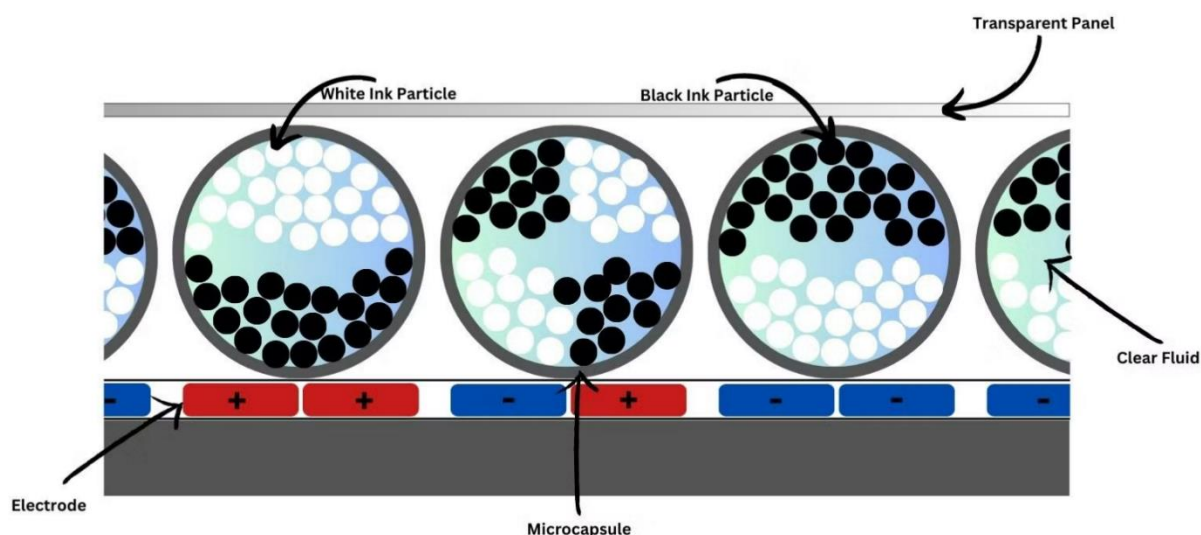


Рис. 1.5 Схема побудови дисплею на основі технології ePaper [7].

ePaper-дисплеї складаються з кількох основних компонентів, які визначають їх функціональні характеристики та енергетичну ефективність. Зокрема, до основних шарів дисплея належать:

- Субстрат — базовий шар дисплея, який може бути виконаний як у вигляді гнучкого, так і жорсткого матеріалу, в залежності від конструкційних особливостей дисплея.
- Капсули з пігментами — мікроскопічні капсули або мікроструктури, що містять заряджені частинки чорного та білого кольорів. Ці частинки переміщуються під впливом електричного поля, що дозволяє формувати зображення на дисплеї.
- Транзисторна матриця (TFT-матриця) — шар, що відповідає за регулювання електричного заряду, необхідного для створення зображення на екрані.

- Захисний шар — прозорий шар, який виконує функцію захисту капсул з пігментами, а також забезпечує довговічність та стійкість дисплея до зовнішніх пошкоджень.

Це дає змогу створити дисплей, що поєднує високу енергетичну ефективність та високу якість зображення, що залишається чітким навіть при різних умовах освітленості.

Коли застосовуються відповідні заряди, формуються високодеталізовані зображення з контрастом і читабельністю традиційних друкованих матеріалів. Це досягається тим, що енергія витрачається виключно під час оновлення інформації, тоді як статичне зображення не потребує живлення. Крім того, ePaper забезпечує чудову видимість навіть за яскравого освітлення, що є важливою перевагою в умовах магазинів з великим рівнем природного або штучного світла. Це досягається використанням прозорої панелі яка відбиває навколишнє світло, підсвічуючи текст і зображення таким чином як це відбувається на традиційному папері. Ця технологія значно зменшує рівень відблисків, забезпечує чудові кути огляду та сприяє зниженню навантаження на зір під час читання. Проте одним з обмежень цієї технології є висока вартість виробництва, а також обмежена кольорова палітра.

Рідкокристалічний дисплей (LCD) являє собою широко використовувану технологію відображення, яка базується на принципі керування рідкими кристалами для формування зображень. LCD - панель складається з кількох ключових компонентів, зокрема підсвічування, вертикального та горизонтального поляризаторів, кольорового фільтра та самої рідкокристалічної панелі [8]. Структура LCD дисплея зображена на рисунку 1.6 .

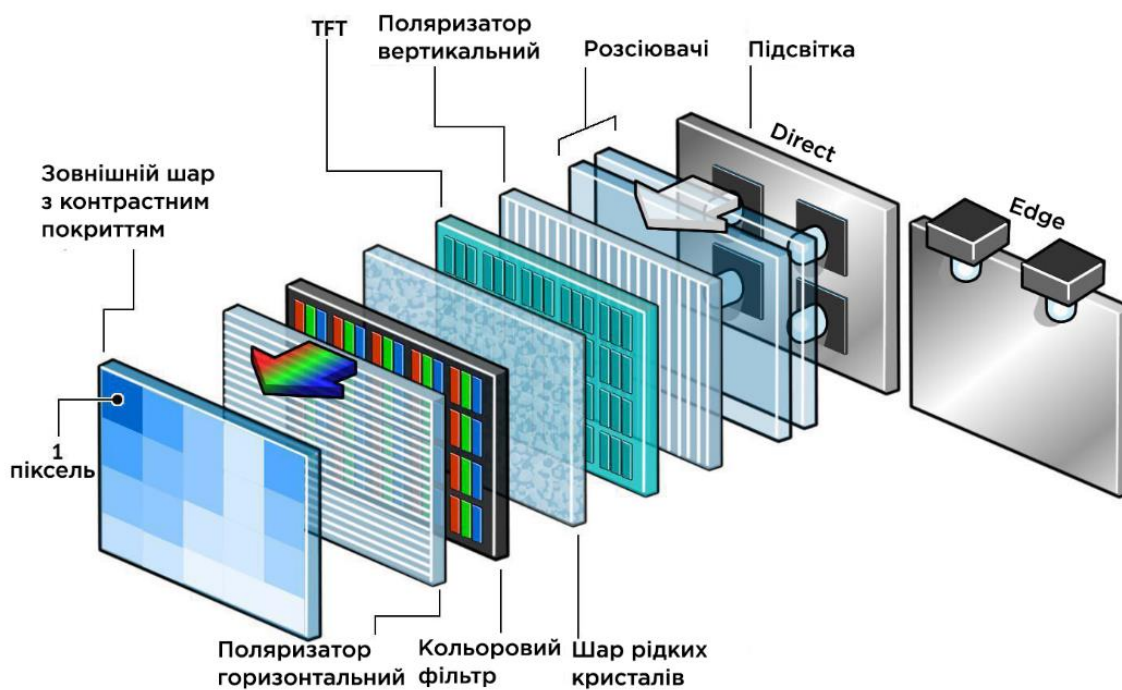


Рис. 1.6 Структура LCD дисплея [8]

Підсвічування, розташоване у задній частині панелі, забезпечує необхідний потік світла (фотонів), який згодом модулюється для створення зображень. Перед підсвічуванням розміщується рідкокристалічний шар, що складається з двох поляризаційних плівок, між якими знаходиться рідкокристалічна речовина. За допомогою електричного управління властивостями рідких кристалів фотони орієнтуються відповідно до вертикального чи горизонтального поляризатора. Це дозволяє формувати зображення з високою точністю кольорів і контрастом. Технологія LCD забезпечує чітке відображення інформації та є основою для багатьох типів пристроїв, включаючи монітори, телевізори, смартфони та цифрові вивіски. Її універсальність і відносна енергоефективність зробили LCD однією з найпоширеніших технологій у сфері відображення.[8]

Сильною стороною даного дисплею є можливість відображення динамічної інформації, проте має суттєві недоліки, такі як вище енергоспоживання та погіршення видимості під прямим сонячним світлом.

До LCD відносяться такі види матриць як TN, IPS, PLS, VA, MVA та PVA які зображено в таблиці 1.1.

Таблиця 1.1

Види матриць та їх характеристики

Тип дисплея	Час реакції (В мілісекундах)	Кількість кольорів (RGB)	Кут спостереження (В градусах)
TN	до 1	до 17 млн кольорів	160-170
IPS	5-6	до 17 млн кольорів	до 178
PLS	5-6	до 17 млн кольорів	до 178
VA	до 4	до 17 млн кольорів	160-170
MVA	5-6	до 17 млн кольорів	до 178
PVA	до 4	до 17 млн кольорів	до 178

У цих матрицях використовуються рідкі кристали, які не здатні самостійно випромінювати світло і потребують зовнішнього джерела світла для функціонування. Насправді екрани побудовані за схожим принципом, але мають різні назви, оскільки виробники розробили різні типи тонких напівпровідникових плівок.

Базова станція є ключовим компонентом системи електронних цінників, що забезпечує централізоване управління та безперебійну передачу даних між сервером та цінниками. Вона виконує функцію комунікаційного вузла, що приймає інформацію про зміну цін з системи управління товарним асортиментом і передає її на окремі електронні цінники у торговельному залі. Основними характеристиками базової станції є потужність передавача, частотний діапазон роботи, максимальна кількість підключених пристроїв та спосіб інтеграції з інфраструктурою підприємства. Приклад базової станції зображена на рисунку 1.7

		Item	Parameters
		Product Model	S-ETAP01R1
		H*V*D	120*120*25(mm)
		Weight	350g
		Color	White
Operating Voltage	DC 5V [using original power supply]	Operating Current	Less than 200mA
Operating Temperature	-10~55℃	Communication Method	433MHz
Storage Temperature	-20~70℃	Communication Distance	15-25m
Storage Humidity	45%~70%RH	Data Interface	Standard Network Cable Interface

Рис. 1.7 Приклад базової станції

Для організації зв'язку між центральною системою та електронними цінниками існує кілька протоколів. Найпоширенішими є Wi-Fi, Zigbee та Bluetooth Low Energy (BLE). Кожен із цих протоколів має різні характеристики щодо діапазону дії, пропускної здатності, енергоспоживання та максимальної кількості підключених пристроїв. У таблиці 1.2 наведено порівняння ключових параметрів Wi-Fi, Zigbee та BLE у контексті застосування в системах Internet of Things (IoT) для електронних цінників.

Таблиця 1.2

Порівняння бездротових протоколів для електронних цінників

Параметр	Wi-Fi (802.11)	Zigbee (IEEE 802.15.4)	Bluetooth LE (BLE)
Частотний діапазон	2,4 ГГц (а також 5 ГГц, 6 ГГц залежно від стандарту)	2,4 ГГц (глобально); деякі регіональні канали ~868/915 МГц	2,4 ГГц
Швидкість передачі даних	Висока – десятки Мбіт/с (типово до 54–150 Мбіт/с за 802.11n)	Низька – до 250 кбіт/с (Zigbee 3.0)	Середня – до 1–2 Мбіт/с (BLE 5)
Дальність зв'язку (в приміщенні)	~50 м (може знижуватися через перешкоди, стіни)	~10–30 м на один “стрибок” (можливе розширення через mesh-мережу)	~10–15 м (BLE 5 має режими для збільшення до ~30–50 м)

Продовження таблиці 1.2

Параметр	Wi-Fi (802.11)	Zigbee (IEEE 802.15.4)	Bluetooth LE (BLE)
Топологія мережі	Зірка: пристрої підключаються до точки доступу (інфраструктурний режим WLAN)	Зірка, дерево: один координатор + маршрутизатори і кінцеві пристрої (самоорганізована mesh-мережа)	Зірка: центральний вузол (хаб) + периферійні пристрої; BLE Mesh доступний для розширення мережі
Максимальна кількість вузлів	Обмежена можливостями точки доступу (десятки пристроїв в одній WLAN)	Дуже велика – до 65 535 пристроїв в мережі (теоретично, практично кілька сотень)	Обмежена при прямому підключенні (до 20 підключень до одного центру); у варіанті BLE Mesh – до 32 767
Енергоспоживання	Високе – модулі Wi-Fi потребують багато енергії (підходить для пристроїв від мережі)	Низьке – протокол розрахований на батарейне живлення багатьох пристроїв	Дуже низьке – оптимізований для роботи від батареї (мінімальні передачі, sleep -режими)
Типові випадки використання	Високошвидкісна передача даних, підключення до інтернету (камери, стримінг, ПК)	Масштабні сенсорні мережі, розумний дім, автоматизація (де потрібна низька потужність та багато вузлів)	Персональні пристрої, носія електроніка, маячки; підключення датчиків до смартфона (на короткі відстані)

Залежно від технології зв'язку, базові станції можуть використовувати різні протоколи передачі даних, зокрема Використання Zigbee дозволяє створювати масштабовані мережі з низьким енергоспоживанням, що є критично важливим для автономної роботи електронних цінників. Розташування базової станції має значний вплив на якість зв'язку, оскільки такі фактори, як перешкоди від будівельних конструкцій або електромагнітні завади, можуть погіршувати стабільність передачі сигналу. Оптимальна конфігурація передбачає встановлення кількох базових станцій у великих торгових приміщеннях для забезпечення рівномірного покриття та зменшення ймовірності втрати сигналу. Основними технологіями бездротової передачі даних, що використовуються у таких системах, є Wi-Fi, Bluetooth та Zigbee. Кожна з цих технологій має власні особливості, що визначають їхню доцільність для застосування у конкретних сценаріях. Wi-Fi є однією з найпоширеніших бездротових технологій зв'язку, що функціонує у частотних діапазонах 2,4 ГГц та 5 ГГц і базується на стандартах IEEE 802.11.

Основною перевагою цієї технології є висока швидкість передачі даних, яка може досягати кількох гігабіт на секунду, що забезпечує ефективну комунікацію між пристроями в локальних і глобальних мережах. Завдяки великому радіусу дії, який у відкритому просторі може сягати 100 метрів, Wi-Fi забезпечує стабільний зв'язок на значних площах. Проте високе енергоспоживання обмежує використання Wi-Fi у пристроях з автономним живленням. Крім того, мережі Wi-Fi часто страждають від інтерференції сигналу, особливо в умовах великої кількості пристроїв, що працюють у тому ж частотному діапазоні. Результати досліджень показують, що середнє енергоспоживання Wi-Fi значно перевищує аналогічні показники інших протоколів.

На рисунку 1.8 представлено порівняння споживання енергії різними протоколами.

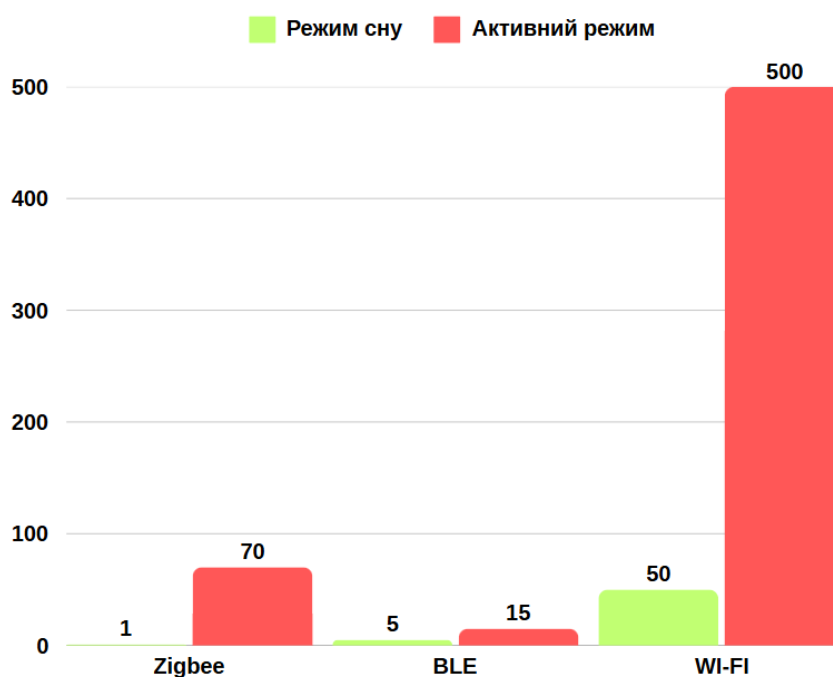


Рис. 1.8 Порівняння споживання енергії різними протоколами.

Bluetooth є бездротовою технологією зв'язку, що працює у діапазоні 2,4 ГГц відповідно до стандартів IEEE 802.15.1. Вона призначена для обміну даними на коротких дистанціях між пристроями та відзначається низьким енергоспоживанням, що робить її ідеальною для пристроїв з автономним живленням. У версії Bluetooth Low Energy (BLE) енергоспоживання було значно

зменшено, дозволяючи пристроям працювати роками без підзарядки. Дослідження, проведені компанією Bluetooth SIG, показали, що BLE може забезпечити до 50% зниження споживання енергії у порівнянні зі стандартним Bluetooth, що робить його ефективним вибором для IoT-рішень та бездротових сенсорних мереж.

Проте Bluetooth має обмежену швидкість передачі даних (до 2 Мбіт/с для Bluetooth 5.0), що поступається іншим протоколам. Також існують обмеження щодо радіусу дії – у більшості випадків він не перевищує 10-30 метрів.

На рисунку 1.2.7 наведено порівняння швидкості передачі даних для основних протоколів.

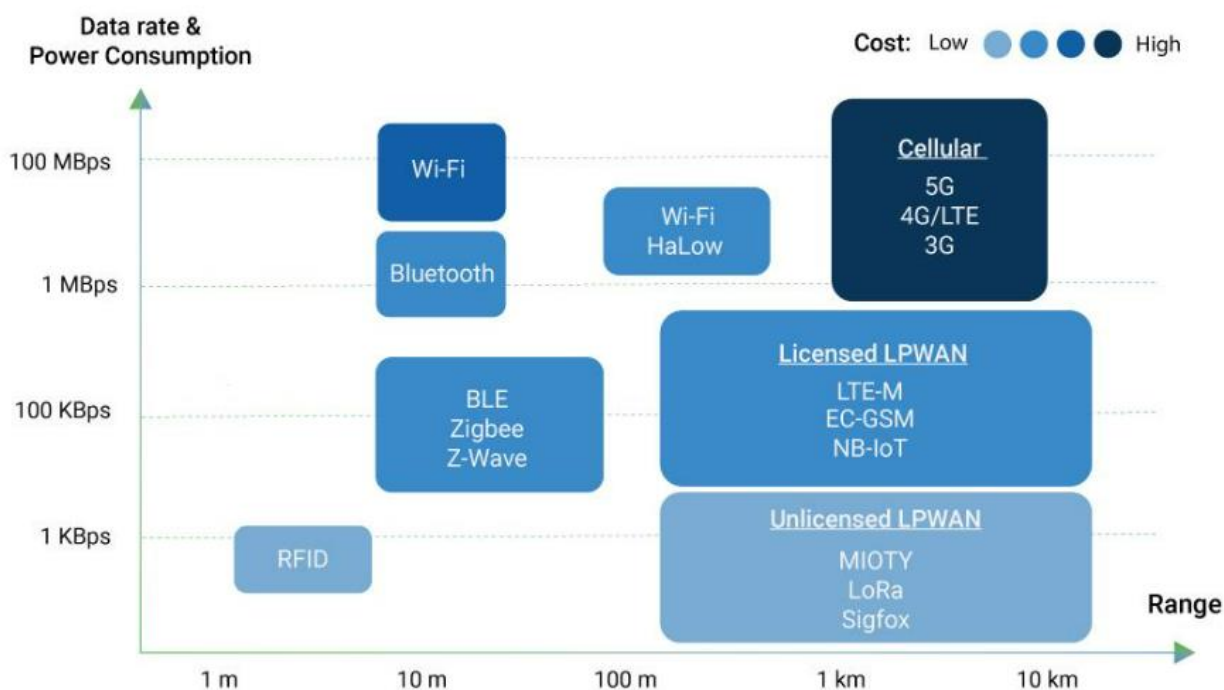


Рис. 1.9 Порівняння швидкості передачі даних [9].

Zigbee являє собою енергоефективну бездротову технологію зв'язку, що працює у частотних діапазонах 2,4 ГГц, 915 МГц та 868 МГц та базується на стандарті IEEE 802.15.4. Вона призначена для створення низькошвидкісних, але надійних мереж зв'язку між пристроями. Завдяки сітчастій топології (mesh), пристрої можуть взаємодіяти не лише з центральним вузлом, а й між собою, передаючи дані через інші вузли.

Основні топології для протоколів можна переглянути на рисунку 1.10.

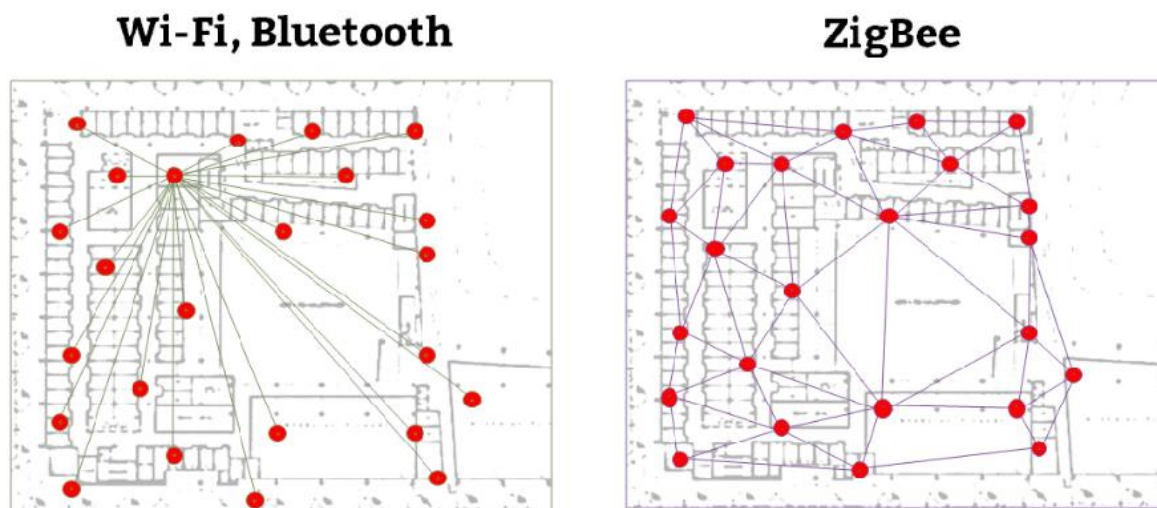


Рис. 1.10 Топології протоколів [10]

Це забезпечує високу відмовостійкість мережі: якщо один вузол виходить з ладу, мережа може автоматично перенаправити трафік через альтернативні маршрути.

Дослідження, проведені Zigbee Alliance, показують, що технологія Zigbee дозволяє одночасно підключати до 65 000 пристроїв у межах однієї мережі, що робить її ідеальним вибором для великих розподілених систем. Ця технологія має надзвичайно мале споживання енергії. Проте вона має суттєве обмеження у швидкості передачі даних (до 250 Кбіт/с), що значно поступається Wi-Fi та Bluetooth. На основі аналізу основних характеристик бездротових протоколів можна зробити висновок, що вибір технології залежить від конкретних вимог до системи. Якщо критичною є швидкість передачі даних, Wi-Fi буде найкращим вибором. Якщо потрібна енергоефективність – Zigbee або Bluetooth. У випадку необхідності побудови гнучкої мережі з великою кількістю підключених пристроїв оптимальним рішенням стане Zigbee.

Зважаючи на вимоги до енергоефективності, надійності зв'язку та можливості масштабування, у цьому дослідженні вибір зупинено на протоколі Zigbee. Він забезпечує низьке енергоспоживання, що є критичним для автономних пристроїв, та підтримує mesh-топологію, що значно підвищує стабільність і гнучкість мережі. Порівняно з Wi-Fi, Zigbee суттєво економить енергію, а у порівнянні з Bluetooth – забезпечує кращу масштабованість і стабільність

з'єднання. Таким чином, Zigbee є оптимальним вибором для реалізації системи електронних цінників.

1.3 Технічний огляд мікроконтролера ESP32-H2 для розробки IoT-рішень

ESP32-H2 був анонсований у 2021 році як еволюційне продовження лінійки мікроконтролерів ESP32, орієнтоване на покращення енергоефективності та розширення можливостей бездротового зв'язку. Розроблений компанією *Espressif Systems*, цей мікроконтролер підтримує сучасні стандарти бездротового зв'язку, зокрема Wi-Fi, Bluetooth Low Energy (BLE) 5.2, Zigbee та Thread, що забезпечує його сумісність із широким спектром IoT-платформ. Основною сферою застосування ESP32-H2 є створення енергоефективних, захищених і функціонально гнучких рішень у сфері Інтернету речей. Апаратна підтримка шифрування, низький рівень споживання енергії та можливість функціонування у бездротових мережах роблять цей мікроконтролер базовим елементом для реалізації інтелектуальних систем, таких як смарт-будинки, смарт-міста, автоматизовані промислові об'єкти, пристрої моніторингу в сільському господарстві та інші рішення, що вимагають ефективного збирання, оброблення та передавання даних у режимі реального часу.

Завдяки своїм характеристикам знайшов широке застосування у різноманітних галузях сучасних інформаційних технологій. Зокрема, він ефективно використовується в інтелектуальних пристроях та системах домашньої автоматизації, у складі сенсорних мереж з низьким енергоспоживанням, а також у пристроях керування та моніторингу, які працюють через бездротові мережі. У промисловій автоматизації демонструє високу ефективність, особливо при роботі з протоколами Zigbee та Thread, які забезпечують енергоефективний і надійний зв'язок між вузлами мережі. Пристрій також має вбудовану флеш-пам'ять і SRAM, що дозволяє створювати автономні та компактні рішення без потреби в зовнішніх модулях збереження даних. За необхідності можна підключити

зовнішню SPI-флеш-пам'ять для зберігання більших обсягів інформації або для реалізації розширених прошивок.

Підтримка протоколів Matter, Zigbee та Thread робить ESP32-H2 ідеальним вибором для систем розумного дому та сучасної промислової автоматизації. Matter, як відкритий стандарт взаємодії пристроїв, забезпечує сумісність між пристроями різних виробників, що критично важливо для розбудови масштабованих та гетерогенних IoT-систем. Zigbee і Thread є енергоефективними протоколами, які дозволяють створювати самовідновлювані бездротові мережі з високим рівнем надійності та масштабованості.

Апаратна конфігурація ESP32-H2 визначає його високу функціональність і гнучкість. Для живлення передбачено кілька варіантів: контакт Vin використовується для підключення зовнішнього джерела живлення; контакт 3.3V забезпечує живлення підключених датчиків; а VUSB слугує входом живлення через USB-роз'єм. Даний контролер зображений на рисунку 1.11.

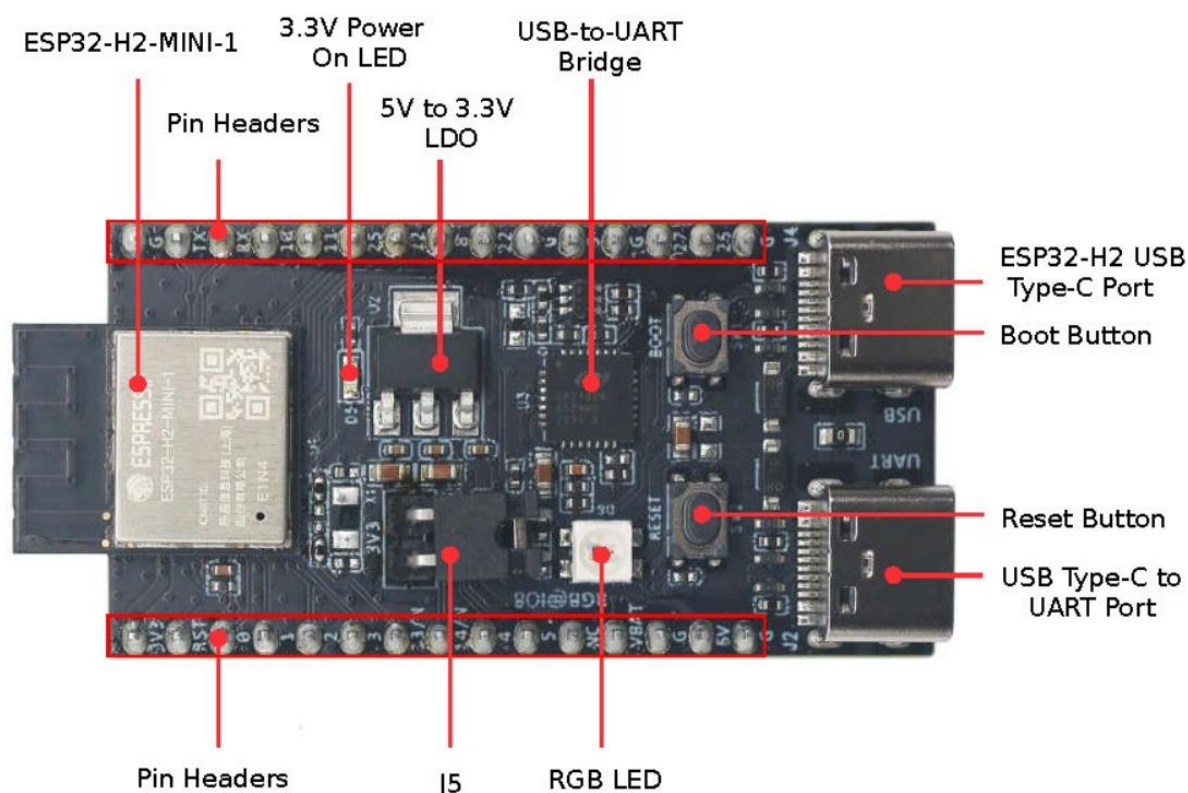


Рис. 1.11 Контролер ESP32-H2 [11]

До універсальних апаратних засобів введення/виведення належать контакти GPIO (General Purpose Input/Output), які можуть програмно конфігуруватися для виконання різноманітних функцій. ESP32-H2 також підтримує UART (Universal Asynchronous Receiver-Transmitter) — асинхронний послідовний інтерфейс для підключення інших пристроїв або модулів; SPI (Serial Peripheral Interface) — високошвидкісний інтерфейс для обміну даними з периферією; та I2C (Inter-Integrated Circuit) — інтерфейс, призначений для підключення датчиків, дисплеїв та інших компонентів. Схема модуля ESP32-H2 представлена на рис 1.12.

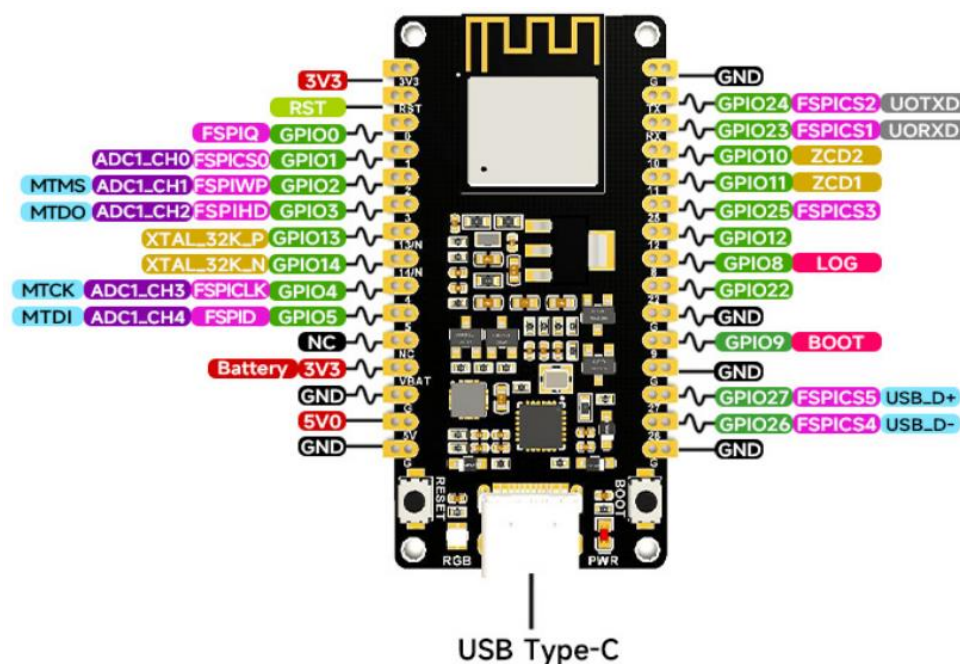


Рис. 1.12 Схема модуля ESP32-H2 [12]

Для оброблення аналогових сигналів у мікроконтролері реалізовано вбудований аналого-цифровий перетворювач (ADC), що забезпечує точне зчитування параметрів навколишнього середовища з аналогових сенсорів. Дана схема зображена на рисунку 1.13.

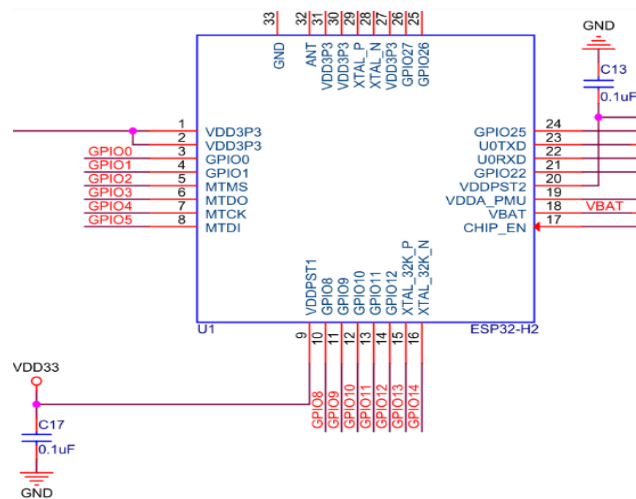


Рис. 1.13 Аналого-цифровий перетворювач (ADC) [13]

У контексті мережевої взаємодії ESP32-H2 підтримує низку протоколів, що забезпечують обмін даними між пристроями в IoT-середовищі. Серед них слід відзначити HTTP-сервери, реалізовані безпосередньо на базі мікроконтролера, що дозволяють здійснювати керування пристроями через веб-браузер. MQTT — простий протокол на основі TCP/IP — є одним із найпопулярніших у сфері IoT і активно використовується на мобільних та десктопних платформах. AllJoyn — відкритий протокол, що підтримується Windows 10 — орієнтований на забезпечення сумісності у смарт-середовищах. Протокол SNMP використовується для керування мережевими пристроями, хоча його ефективність обмежується можливими блокуваннями з боку мережесих брандмауерів. У промислових системах часто використовуються ModBus та інші спеціалізовані інтерфейси, орієнтовані на високонадійне середовище роботи.

2 ПРОЄКТУВАННЯ АПАРАТНОЇ ЧАСТИНИ СИСТЕМИ

2.1. Вимоги до побудови системи електронних цінників

В рамках даної роботи було поставлено задачу метою якої є розробка системи електронних цінників на базі платформи ESP-32H2 з використанням E-Ink дисплеїв, яка забезпечить автоматичне оновлення інформації про ціни з бази даних.

Система електронних цінників повинна виконувати такі функції:

- Автоматичне оновлення цін отримання актуальних даних з бази даних супермаркету.
- Відображення додаткової інформації акції, знижки, терміни придатності, QR-коди для додаткової інформації.
- Заміна цін протягом дня в пікові години або в залежності від дня тижня.
- Індикатор наявності товару відображення статусу «Є в наявності» або «Закінчується».

Також до системи електронних цінників є ряд вимог.

- Надійність.
- Захист від атак на програмне забезпечення.
- Мінімізація можливості виникнення неполадок програмного характеру.
- Можливість оновлення програмного забезпечення.
- Довготривалий термін автономної роботи.
- Можливість заміни компонентів системи.
- Міцність корпусу.

Система електронних цінників складається з наступних компонентів:

Комунікаційна станція : Відповідає за стабільність і надійність передачі на велику відстань від програмного забезпечення керування етикеткою до етикетки. Бездротовий зв'язок має підтримувати радіус застосування, швидкість, час

автономної роботи та надійність. Засоби бездротового зв'язку можуть базуватися на радіозв'язку, інфрачервоному або навіть видимому світлі. Наразі ринок значною мірою схиляється до рішень на основі радіочастот.

Програмне забезпечення для керування етикетками : відповідає за конфігурацію системи, конфігурацію властивостей самої етикетки та зберігання бази даних для списку цін. Програмне забезпечення головним чином охоплює керування мережею, файловими системами та передачею даних. Також обробляє та пакує дані інформації про продукт і ціни, налаштовані в пакети інформації. Потім пакети даних надсилаються на станцію зв'язку через бездротову мережу. Як правило, це централізоване програмне забезпечення, яке відповідає за побудову та підтримку мережі для передачі даних між програмним забезпеченням керування етикетками та дисплеєм терміналу.

Електронний цінник : функціонує як приймач від станції зв'язку для відображення ціни, налаштованої з програмного забезпечення для керування етикетками.

Пристрій планується використовувати в мережі гіпермаркетів та супермаркетів в якості системи яка буде спрощувати механізм оновлення ціни і цим самим підвищуючи ефективність роботи інших сфер торгівлі.

Типовий електронний цінник використовує центральний процесор із наднизьким енергоспоживанням і рішення для бездротового зв'язку, щоб відповідати обмеженням низької потужності та низької вартості, щоб замінити велику кількість статичних етикеток на полицях, необхідних у середньому роздрібному магазині.

Вимоги до побудови системи електронних цінників можна поділити на функціональні та нефункціональні. Функціональні вимоги визначають основні задачі, які система повинна реалізовувати відповідно до її призначення. Нефункціональні вимоги стосуються якості, зручності використання, безпеки та інших характеристик системи, що не пов'язані безпосередньо з її функціональністю.

Функціональні вимоги:

1. Автоматичне оновлення цін – система повинна здійснювати регулярне зчитування даних із бази даних та оновлювати ціnnики в торговій залі без участі людини.
2. Відображення розширеної інформації – на ціnnиках мають відображатися дані про акції, знижки, термін придатності товару, QR-коди для переходу на сторінку товару тощо.
3. Гнучке управління цінами – підтримка оновлення цін у визначений час (наприклад, за розкладом, у пікові години чи у вихідні дні).
4. Індикація наявності товару – на дисплеї має відображатися актуальний статус товару: «Є в наявності», «Закінчується» або «Відсутній».
5. Централізоване управління системою – усі налаштування, конфігурація ціnnиків і оновлення даних повинні здійснюватися через серверне програмне забезпечення.
6. Підтримка великої кількості пристроїв – система має бути масштабованою та забезпечувати роботу десятків або сотень електронних ціnnиків у рамках одного магазину.

Нефункціональні вимоги:

1. Енергоефективність – система повинна працювати упродовж тривалого періоду (до кількох років) від однієї батареї завдяки використанню технологій E-Ink та Zigbee.
2. Надійність бездротового з'єднання – стабільна передача даних у межах торгівельної площі з урахуванням можливих перешкод і завантаженості каналу.
3. Захист переданої інформації – дані мають бути захищені від несанкціонованого доступу шляхом використання криптографічних протоколів.

4. Можливість оновлення ПЗ – як серверна частина, так і мікропрограмне забезпечення на пристроях повинні підтримувати віддалене оновлення.
5. Простота обслуговування – конструкція цінників має дозволяти швидку заміну окремих компонентів (дисплей, акумулятор, модуль зв'язку).
6. Стійкість до зовнішніх впливів – цінники мають бути захищені від пилу, вологи та механічних пошкоджень, рекомендовано IP-захист не нижче IPx4.
7. Інтеграція з існуючими системами – система повинна мати інтерфейси для взаємодії з товарообліковими програмами або ERP-системами підприємства.
8. Швидкодія – зміни в базі даних повинні відображатися на електронному ціннику не пізніше ніж через 20 секунд.

2.2. Вибір і обґрунтування апаратних компонентів

Виходячи з поставленої задачі, вимог та функцій пристрою, що були описані у попередньому підрозділі, для виконання всіх своїх задач пристрій має складатися з таких елементів:

- Плата керування ESP32-H2
- Дисплей трьох кольоровий Waveshare E-Ink 2.13" 212x104
- Адаптерна плата DESPI-C02
- LiPower акумулятор літій-полімерний LP402245
- ZIGBEE3.0 Координатор контролер

Плата керування ESP32 H-2 буде використана в проєкт в якості плати контролера для електронного цінника. Детальний опис даного мікроконтролера був наведений в першому розділі.

Для проєкту була обрана саме ця плата керування з таких причин як низьке енергоспоживання легкість програмування відносно невелика вартість, надійність, а також те, що на ньому підтримуються протоколи передачі даних

Bluetooth Low Energy (BLE), Zigbee і Thread, що в майбутньому може допомогти вдосконалювати проєкт без заміни компонентів.

ESP32-H2 підтримує різноманітні середовища програмування, включаючи популярні інструменти Arduino IDE та ESP-IDF (Espressif IoT Development Framework). Це надає розробникам широкі можливості для адаптації платформи під конкретні потреби проєкту, що спрощує інтеграцію з іншими системами і дозволяє швидко розробляти програмне забезпечення для IoT-пристроїв.

Завдяки підтримці відкритого коду та величезному ком'юніті розробників, платформа ESP32-H2 має широкий вибір бібліотек і готових рішень, що забезпечує швидке впровадження нових функцій та вдосконалення існуючих програмних рішень.

Враховуючи постійно зростаючі вимоги до екологічної відповідальності в технологічній індустрії, платформа ESP32-H2 є економічно вигідним рішенням, що дозволяє створювати енергоефективні IoT-системи, які сприяють збереженню природних ресурсів. Завдяки зниженому енергоспоживанню, платформу можна використовувати в довготривалих, автономних пристроях, що працюють на батареях, без необхідності частої заміни елементів живлення.

Дисплей E-Ink 2,13 дюйма з роздільною здатністю 212×104 пікселів обрано як основний елемент візуального відображення інформації у розроблюваній системі. Зображений на рисунку 2.1



Рис. 2.1 Дисплей E-Ink

Дана модель підтримує три кольори (червоний, чорний, білий). Основною перевагою E-Ink дисплея є відсутність підсвічування, завдяки чому зображення

зберігається на екрані навіть після відключення живлення. Це робить його ідеальним рішенням для застосувань, де важлива енергоефективність, таких як цінники на полиці, промислові інструменти та автономна портативна електроніка. Підтримка трьох кольорів дозволяє більш інформативно відображати дані, наприклад, виділяти важливу інформацію червоним кольором. Дисплей має компактні габарити — $29,2 \text{ мм} \times 59,2 \text{ мм} \times 0,98 \text{ мм}$, що сприяє його інтеграції в пристрої з обмеженим простором. Розмір області відображення складає $23,71 \text{ мм} \times 48,55 \text{ мм}$ з кроком точки $0,229 \times 0,228 \text{ мм}$. Завдяки цьому забезпечується висока чіткість зображення при мінімальному енергоспоживанні. Повне оновлення дисплея займає близько 15 секунд, що є прийнятним для застосувань, де не потрібна висока частота оновлення. Дисплей підтримує 3-провідний та 4-провідний SPI інтерфейс, що дозволяє легко інтегрувати його з різними мікроконтролерами, включаючи ESP32-H2.

Робоча напруга становить 3,3 В, що повністю відповідає стандартам сучасних вбудованих систем. Споживана потужність при оновленні складає 26,4 мВт, а в режимі очікування — менше 0,017 мВт, що підкреслює його наднизьке енергоспоживання. Для підключення дисплея можуть бути використані наступні плати драйверів: e-Paper Driver HAT (Universal), e-Paper Shield (Arduino/NUCLEO), e-Paper ESP8266 Driver Board (WiFi), DESPI-C02. та e-Paper ESP32 Driver Board (WiFi / Bluetooth). Це забезпечує гнучкість у виборі платформи для розробки та інтеграції. Таким чином, обраний E-Ink дисплей є оптимальним рішенням для створення енергоефективної, компактної та інформативної системи візуалізації даних.

Для забезпечення надійного та ефективного підключення e-рарер дисплея до мікроконтролера ESP32 у розроблюваній системі було обрано адаптерну плату DESPI-C02 яка зображена на рисунку 2.2.



Рис. 2.2 Адаптерна плата DESPI-C02 [15]

Ця плата призначена для спрощення інтеграції е-рарег дисплеїв з інтерфейсом SPI, забезпечуючи стабільну роботу та зручність у використанні.

Підтримує підключення е-рарег дисплеїв через 24-контактний FPC-роз'єм з кроком 0,5 мм, що відповідає стандартам більшості сучасних е-рарег панелей. Плата має компактні розміри (41×22 мм), що дозволяє легко інтегрувати її в пристрої з обмеженим простором. Комунікація з мікроконтролером здійснюється через 4-провідний SPI-інтерфейс, що забезпечує швидку та надійну передачу даних.

Наявність DIP-перемикача дозволяє вибирати опір RESE (3Ω або 0,47Ω), що забезпечує сумісність з різними моделями е-рарег дисплеїв. Плата працює при напрузі 3,3 В, що повністю відповідає вимогам мікроконтролера ESP32. Діапазон робочих температур від -20°C до +70°C дозволяє використовувати її в різноманітних умовах експлуатації. Завдяки своїй універсальності та сумісності з широким спектром е-рарег дисплеїв, включаючи моделі розміром до 13,3 дюймів, є оптимальним вибором для проєктів, де необхідна енергоефективність, компактність та надійність відображення інформації. Таким чином, використання адаптерної плати у поєднанні з мікроконтролером ESP32 забезпечує ефективне та стабільне підключення е-рарег дисплея, що є важливим етапом у реалізації енергоефективної та надійної системи візуалізації даних.

У розробці енергоефективної портативної системи живлення було обрано літій-полімерний акумулятор LP402245-PCM-NTC-LD виробництва компанії EEMB який зображено на рисунку 2.3.



Рис. 2.3 Літій-полімерний акумулятор LP402245 [17]

Даний акумулятор характеризується високою енергетичною щільністю та компактними розмірами ($46 \times 22,5 \times 4,3$ мм), що сприяє його інтеграції в малогабаритні пристрої. Номінальна напруга акумулятора становить 3,7 В при ємності 330 мА·год, що забезпечує достатній рівень автономної роботи системи. Максимальний струм зарядки складає 330 мА, а максимальний струм розрядки — 660 мА. Робочий температурний діапазон включає 0-+45 °С для зарядки та -20-+60 °С для розрядки. Акумулятор оснащений PCM (Protection Circuit Module) для забезпечення захисту від перенапруги, глибокого розрядження, короткого замикання та перегріву, що підвищує його надійність і безпеку експлуатації зображений на рисунку 2.4.

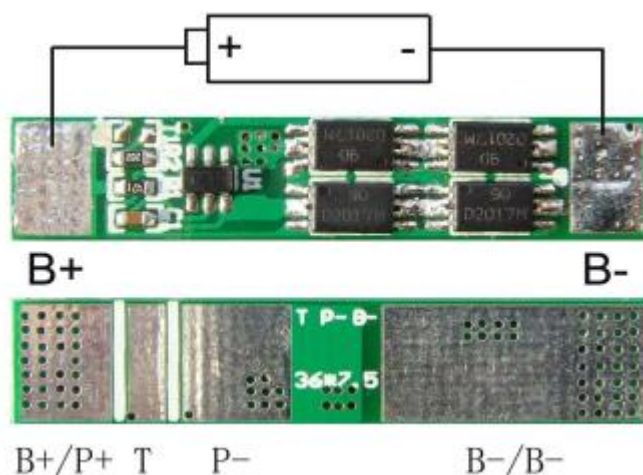


Рис. 2.4 Protection Circuit Module[18]

Вбудований NTC (Negative Temperature Coefficient) забезпечує контроль температури під час зарядки та розрядки, що мінімізує ризик термічних пошкоджень. Завдяки цим характеристикам, LP402245-PCM-NTC-LD є оптимальним вибором для автономних пристроїв з високими вимогами до енергоефективності та компактності. Важливою характеристикою літій-полімерних акумуляторів є їхня здатність витримувати велику кількість циклів заряд-розряд без суттєвої втрати ємності. Для моделі LP402245-PCM-NTC-LD цей показник становить приблизно 300–500 циклів за умови дотримання рекомендацій з експлуатації, що забезпечує тривалий термін служби пристроїв, у яких він використовується. Компактність акумулятора з габаритами $46 \times 22,5 \times 4,3$ мм і вагою близько 7 грамів дозволяє інтегрувати його в малі пристрої, де критичними є розмір і маса. Таким чином, акумулятор LP402245-PCM-NTC-LD забезпечує надійне та стабільне живлення для малогабаритних пристроїв, поєднуючи енергоефективність, компактність та високу безпеку експлуатації. Його технічні параметри роблять його оптимальним вибором для широкого спектра портативних електронних рішень, де важливими є тривалий час автономної роботи, безпека та стійкість до змін навколишнього середовища.

Універсальний Zigbee-контролер SMLight SLZB-06P7 є універсальним пристроєм, призначеним для забезпечення надійного та ефективного зв'язку між компонентами системи розумного будинку. Цей контролер підтримує стандарт Zigbee 3.0 та сумісний із широким спектром пристроїв від різних виробників,

таких як Tuuya, IKEA, Xiaomi, Gledopto, Moes, Sonoff та інших. Основою апаратної частини SLZB-06P7 є мікросхема CC2652P7 від компанії Texas Instruments яка зображена на рисунку є високопродуктивним бездротовим мікроконтролером, призначеним для реалізації багатопротокольного зв'язку в діапазоні 2,4 ГГц. Вона є основним елементом універсального Zigbee-контролера SMLight SLZB-06P7, забезпечуючи його функціональність та ефективність. Основу CC2652P7 становить 32-бітний процесор Arm® Cortex®-M4F з тактовою частотою 48 МГц, що поєднує високу обчислювальну потужність і енергоефективність зображена на рисунку 2.5.

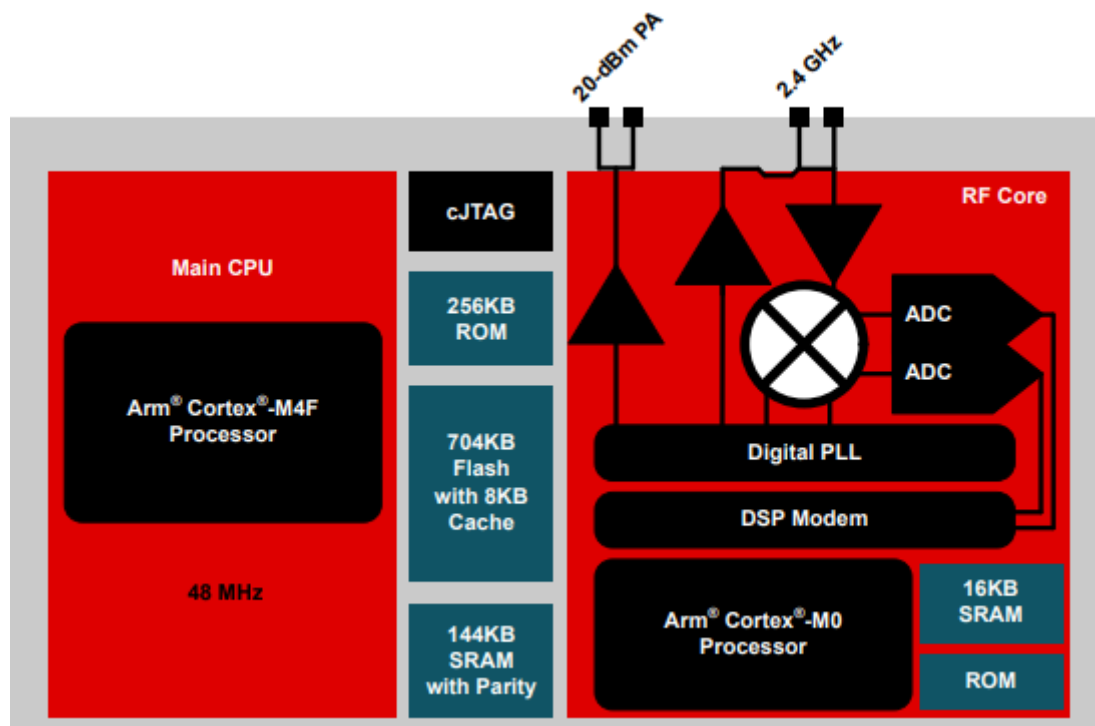


Рис. 2.5 мікросхема CC2652P7 [19]

Мікроконтролер оснащений 704 КБ флеш-пам'яті для зберігання коду, 256 КБ ПЗП для протоколів і бібліотек, а також 8 КБ кеш-пам'яті SRAM та 144 КБ енергоощадної SRAM.

CC2652P7 підтримує динамічне управління багатопротокольним зв'язком (DMM), що забезпечує одночасну роботу з Bluetooth® 5.2 Low Energy, Thread та Zigbee 3.0. Це дозволяє створювати гнучкі бездротові мережі для інтеграції різних пристроїв. Також мікроконтролер підтримує модуляції 2-(G)FSK, 4-(G)FSK та MSK, розширюючи його можливості. Периферійні інтерфейси CC2652P7

включають два SPI, I2C, I2S, чотири таймери, 8-бітний ЦАП та контролер датчиків, що забезпечує інтеграцію з різними сенсорами та пристроями. Він підтримує до 26 GPIO для підключення додаткових компонентів. Для забезпечення безпеки даних CC2652P7 має апаратний прискорювач криптографічних операцій, включаючи генератор випадкових чисел, захист від несанкціонованого доступу та безпечне оновлення прошивки. Це робить його надійним вибором для розумних будинків. Контролер підтримує кілька варіантів підключення: Ethernet, Wi-Fi та USB, що забезпечує зручність інтеграції в існуючі мережеві інфраструктури. Підтримка технології Power over Ethernet (PoE) за стандартом IEEE 802.3af дозволяє передавати живлення та дані через один кабель, спрощуючи встановлення пристрою. SLZB-06P7 поставляється з попередньо встановленим програмним забезпеченням, сумісним із Zigbee2MQTT та ZHA, що дозволяє швидко інтегрувати контролер у системи на базі Home Assistant без додаткових налаштувань. Крім того, пристрій підтримує дистанційне оновлення прошивки, що забезпечує актуальність програмного забезпечення та безпеку системи контролер зображено на рисунку 2.6.



Рис. 2.6 Універсальний Zigbee-контролер SMLight SLZB-06P7[20]

Компактний дизайн контролера (160 x 22 x 24 мм) дозволяє легко розміщувати його в обмеженому просторі, а зовнішня антена з підсиленням +5 dB забезпечує стабільний зв'язок навіть у складних умовах. Наявність світлодіодної індикації спрощує моніторинг стану пристрою та мережі. Таким чином, SMLight SLZB-06P7 є надійним та універсальним рішенням для побудови та управління Zigbee-мережами в системах розумного будинку, забезпечуючи високу сумісність, гнучкість у налаштуваннях та зручність у використанні.

Корпус електронного цінника, зображений на рисунку 2.7 призначений для надійного захисту та зручного розміщення внутрішніх компонентів пристрою, забезпечуючи естетичний вигляд та функціональність. Виконаний із високоякісного пластику, він забезпечує міцність, стійкість до механічних пошкоджень та впливу зовнішніх факторів. Його конструкція передбачає компактні розміри, що робить цінник зручним для встановлення на різні торговельні поверхні та кріплення на полицях або стелажа.



Рис. 2.7 Корпус електронного цінника [21].

На рисунку 2.8 зображено дизайн корпусу, який оптимізований для розміщення ePaper-екрану діагоналю 2.13 дюйма, який забезпечує чітке та контрастне відображення інформації навіть при яскравому освітленні. Передня частина корпусу має спеціальне вікно для дисплея, що захищене прозорою панеллю з антибліковим покриттям. Це дозволяє не лише зберігати екран у чистоті, але й підвищує зручність читання даних з будь-якого кута огляду.



Рис. 2.8 Корпус електронного цінника

Тильна сторона корпусу (рисунок 2.9) оснащена спеціальними кріпленнями для надійної фіксації пристрою у потрібному положенні. Внутрішній простір корпусу розроблений таким чином, щоб усі електронні компоненти були надійно закріплені, мінімізуючи ризик пошкоджень під час експлуатації.



Рис. 2.9 Тильна сторона корпусу

Таким чином, корпус електронного цінника поєднує в собі естетику, практичність та високий рівень захисту внутрішніх компонентів, що робить його ідеальним рішенням для використання в умовах роздрібної торгівлі.

2.3 Розробка схеми підключення електронного цінника

Система базується на використанні мікроконтролерів та дисплеїв з технологією електронного чорнила (ePaper), які забезпечують високу енергоефективність та чіткість відображення інформації незалежно від кута огляду та рівня освітлення. Для забезпечення взаємодії між електронними цінниками та центральною базою даних використовується протокол Zigbee, що характеризується низьким енергоспоживанням та стійкістю до перешкод. Це дозволяє створити розгалужену мережу з великою кількістю підключених пристроїв, які можуть синхронно оновлювати дані без суттєвих затримок. На рисунку 2.10 представлена загальна архітектура системи, яка включає сервер, шлюз Zigbee, електронні цінники та центральну базу даних.



Рис. 2.10 Загальна архітектура системи

Взаємодія відбувається через бездротову мережу, що дозволяє централізовано оновлювати ціни та інформацію про товари в режимі реального часу.

Суттєвою перевагою системи є можливість інтеграції з існуючими програмними комплексами для управління роздрібними мережами. Це дає можливість оперативно реагувати на коливання ринкових цін, запускати акційні пропозиції та оптимізувати управління запасами. Впровадження електронних цінників сприяє підвищенню конкурентоспроможності підприємства, оскільки дозволяє швидко адаптувати ціни відповідно до ринкової ситуації та економити ресурси, що витрачаються на обслуговування традиційних паперових цінників.

На рисунку 2.11 зображена монтажна схема підключення компонентів системи до контролера.

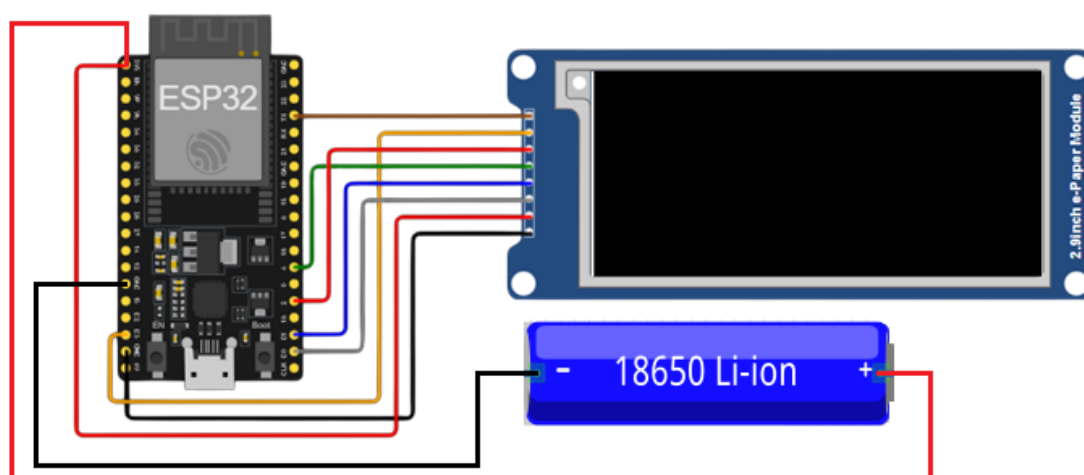


Рис. 2.11 Монтажна схема підключення компонентів системи до контролера.

Також присутня принципова електрична схема на рисунку 2.12.

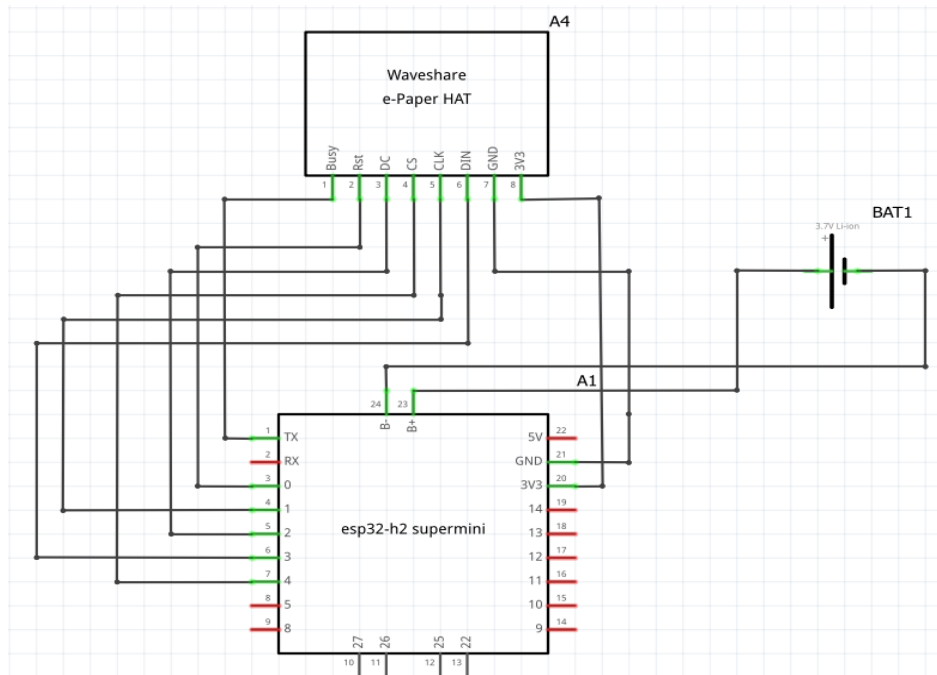


Рис. 2.12 Принципова електрична схема.

Принципова електрична схема відображає з'єднання між мікроконтролером ESP32-H2, електронним паперовим дисплеєм та живленням від літієвого акумулятора. ESP32-H2 виконує роль основного обчислювального модуля, забезпечуючи управління елементами системи та обмін даними з дисплеєм. дисплей підключений до ESP32-H2 через шину SPI, яка включає сигнали DC, CS, CLK та DIN, а також додаткові сигнали Busy та RST для керування станом дисплея. Живлення для ESP32-H2 і e-Paper HAT здійснюється від літієвого акумулятора на 3.7 В, який підключений до відповідних ліній живлення. Схема побудована таким чином, щоб забезпечити надійну передачу даних між мікроконтролером та дисплеєм, а також стабільне живлення під час роботи. Завдяки прямим підключенням безпосередньо до пінів мікроконтролера, забезпечується мінімальний рівень затримок і висока швидкість оновлення інформації на екрані.

3 РОЗРОБКА ПРОГРАМНОГО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ТА ТЕСТУВАННЯ

3.1. Алгоритм роботи програмного забезпечення

У даному підрозділі описано алгоритм функціонування розробленого програмного забезпечення електронного цінника на базі ESP32-H2. Основною метою ПЗ є забезпечення автоматичного отримання та відображення актуальних цін із центральної бази даних на E-Ink дисплеї кожного цінника. Система складається з центрального сервера (що містить MySQL-базу даних та програмний модуль оновлення), Zigbee-координатора (SMLight SLZB-06P7) та розподілених бездротових цінників на основі ESP32-H2 з ePaper-дисплеями.

Алгоритм роботи враховує енергоефективність та надійність: бездротові цінники працюють від батареї, тому більшу частину часу перебувають у сплячому режимі і активуються лише для отримання оновлень та перезапис екрану. Такий підхід можливий завдяки застосуванню технології Zigbee, яка підтримує режим низького енергоспоживання та високу місткість мережі (до 65 тисяч вузлів). Zigbee-вузли можуть утворювати mesh-мережу, що забезпечує автоматичне перепризначення маршрутів при втраті вузла і підвищує відмовостійкість зв'язку. Для нашої системи Zigbee обрано саме через ці властивості – він дозволяє підтримувати мережу з багатьох цінників з мінімальним споживанням енергії кожним вузлом та стабільною передачею даних навіть у разі перешкод або виходу окремих пристроїв з ладу.

Архітектура алгоритму. Логіку роботи ПЗ можна умовно розділити на дві частини: серверну (бекенд) та вбудовану (прошивка цінника). На серверному боці спеціальний модуль (скрипт або сервіс) періодично або за подією перевіряє базу даних MySQL на наявність змін цін. Це може бути реалізовано шляхом періодичного опитування або за допомогою механізму нотифікацій/тригерів бази даних про зміну запису. При виявленні змін модуль формує пакет оновлення, який містить необхідну інформацію для цінника: ідентифікатор товару або цінника та нову ціну (а за потреби й інші дані, наприклад назву товару, одиниці виміру тощо). Цей пакет надсилається на Zigbee-координатор для передачі

відповідному пристрою-ціннику. На боці цінника (ESP32-H2) прошивка працює за подієво-орієнтованим алгоритмом: більшість часу пристрій перебуває у стані глибокого сну для економії енергії, періодично пробуджуючись для опитування координатора щодо наявності повідомлень. Якщо координатор має буферизоване повідомлення (оновлення) для даного вузла, цінник його отримує та переходить до обробки. Після прийому оновлення прошивка розпаковує дані (наприклад, зчитує нову ціну) та виконує оновлення зображення на E-Ink дисплеї.

Кроки алгоритму оновлення: Узагальнений алгоритм роботи системи представлено в такій послідовності (рис. 3.1):

- Отримання даних про зміну ціни. Адміністратор або зовнішня система змінює ціну товару в центральній базі даних (наприклад, SQL-запит `UPDATE products SET price = 140 WHERE id = 321`). Тригер у базі або цикл опитування виявляє цю зміну і додає завдання на оновлення цінника у чергу оновлень.
- Формування повідомлення для цінника. Програмний модуль серверу формує повідомлення, що містить нові дані для відображення. Повідомлення може включати ідентифікатор пристрою-цінника, нову ціну та службову інформацію (контрольні суми, мітки часу тощо). Можливі два підходи: надсилати тільки змінені числові дані (щоб цінник сам сформував зображення), або ж надсилати готове зображення для відображення. Другий підхід потребує більше трафіку, але знижує навантаження на пристрій. У нашій реалізації використано перший підхід – передачу текстових даних – оскільки ESP32-H2 достатньо продуктивний для генерування зображення на основі отриманих даних, а трафік Zigbee обмежений 250 Кбіт/с. (Альтернативний підхід використовується в промислових ESL-системах: з серверу генерується зображення нового цінника та публікується через MQTT-шлюз, після чого етикетка відображає отриману картинку. Однак, такий спосіб збільшує розмір переданих даних.)
- Передача повідомлення через Zigbee. Сформоване оновлення через API Zigbee-координатора відправляється бездротовою мережею. Координатор SMLight SLZB-06P7, будучи шлюзом, ретранслює повідомлення у Zigbee-

мережу на адресу вузла-цінника. Згідно зі стеком Zigbee, якщо цінник спить, координатор тимчасово збереже повідомлення у буфері і дочекається запиту від сплячого вузла. Як тільки цінник прокинеться (згідно налаштованого інтервалу опитування, наприклад раз на кілька секунд), координатор передасть йому буферизовані дані. Це неблокуючий асинхронний механізм обміну, що дозволяє мінімізувати активний час роботи батарейного пристрою.

- **Прийом оновлення цінником.** ESP32-H2, проснувшись і надіславши запит до координатора, отримує Zigbee-повідомлення з оновленням. Пристрій перевіряє цілісність та коректність даних (наприклад, контрольну суму або CRC пакету). Після успішної валідації цінник витягає нове значення ціни та іншу інформацію для відображення.
- **Оновлення E-Ink дисплея.** Мікроконтролер ініціює перезапис буферу зображення для ePaper-дисплея. На базі отриманих даних генерується графічне зображення – як правило, це чорно-білий шаблон з відображенням ціни великими цифрами, назви товару тощо. Для виведення використовується SPI-інтерфейс ESP32-H2, підключений до дисплея через адаптер DESPI-C02. Сам E-Ink дисплей споживає енергію тільки в момент оновлення зображення, а при статичному відображенні не потребує живлення. Це означає, що після завершення оновлення екран може відображати нову ціну необмежено довго без додаткових витрат заряду батареї. На рисунку 3.1 блок «Оновлення дисплея» відображає цей процес.[22]
- **Підтвердження та перехід у сплячий режим.** Після успішного оновлення пристрій формує підтвердження (acknowledgment) про отримання оновлення, яке надсилається координатору (це може бути Zigbee-повідомлення у зворотному напрямку). Координатор, у свою чергу, може передати це підтвердження серверному модулю, який відмічає завдання як виконане. Завершивши цикл оновлення, прошивка переводить ESP32-H2 назад у режим сну до наступного інтервалу опитування або наступного апаратного пробудження.

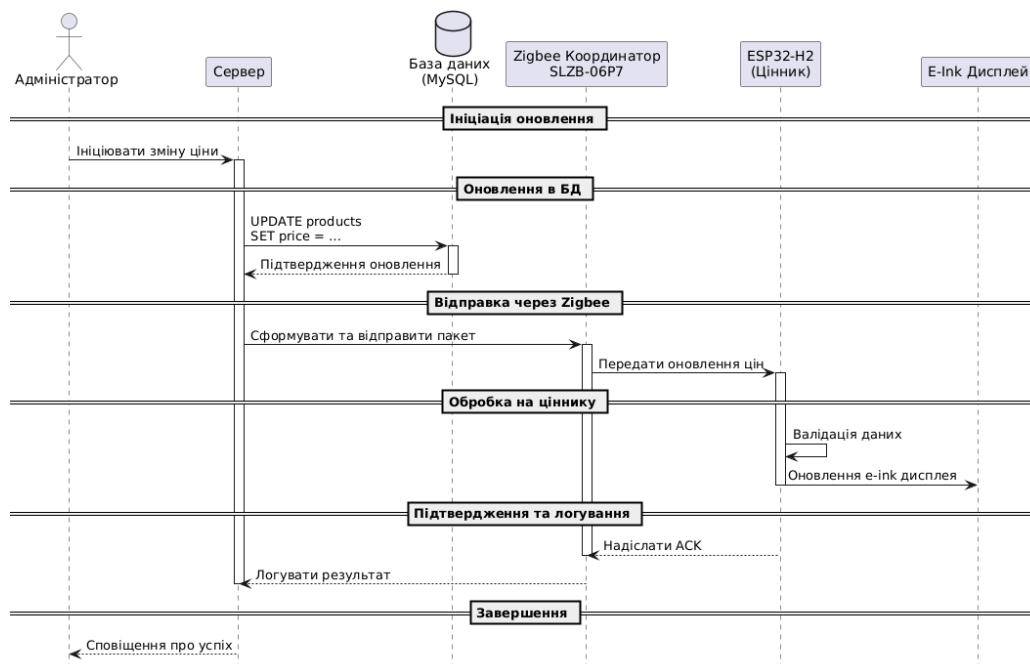


Рис. 3.1 Діаграма послідовностей процесу оновлення цін

Для спрощеного представлення архітектури процесу роботи програмного забезпечення на рівні основних логічних кроків, на рисунку 3.2 подано узагальнену блок-схему. Вона демонструє загальну послідовність обміну даними між сервером, Zigbee-координатором та електронним цінником, із фокусом на циклічний характер оновлення інформації.

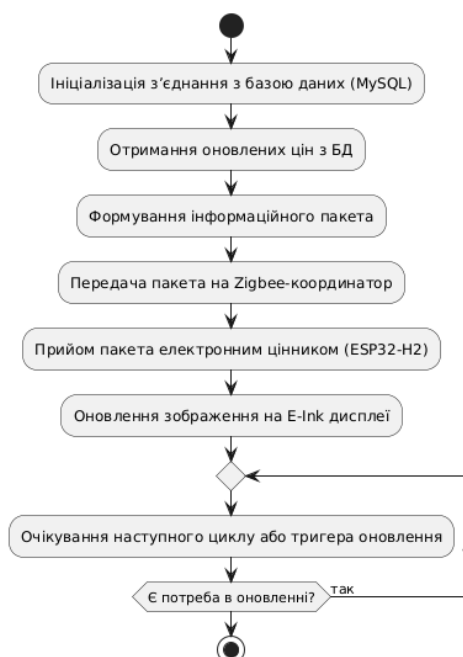


Рис. 3.2 Узагальнена блок-схема алгоритму роботи програмного забезпечення системи електронних цінників

Важливо відзначити, що ESP32-H2 як основа цінника забезпечує необхідну обчислювальну потужність та бездротовий інтерфейс для реалізації згаданого алгоритму. Цей мікроконтролер містить одноядерний 32-бітний RISC-V процесор із тактовою частотою до 96 МГц, а також радіомодуль IEEE 802.15.4, сертифікований для роботи з протоколом Zigbee. Завдяки цьому, прошивка цінника може одночасно обробляти логіку оновлення дисплея і забезпечувати надійний зв'язок у мережі. Алгоритм роботи пристрою оптимізовано під низьке енергоспоживання: використано таймери та переривання для пробудження, а радіомодуль працює в режимі End Device (сплячий вузол) з періодичним polling батьківського вузла (координатора) для перевірки наявності нових даних. Така організація підтверджує, що поставлені цілі – автоматичне оновлення інформації та енергоефективність – досягнуто через коректно спроектований алгоритм програмного забезпечення.

3.2. Взаємодія з базою даних та оновлення інформації на цінниках

У цьому підрозділі детально розглянуто процес обміну даними між центральною базою даних та бездротовими цінниками, а також роль Zigbee-координатора SMLight SLZB-06P7 у цьому процесі. Взаємодія охоплює такі аспекти: підключення до MySQL-баз даних, передача оновлень через координатор у Zigbee-мережу, та механізми оновлення інформації на E-Ink дисплеях цінників. Особливу увагу приділено тому, як забезпечується цілісність даних та синхронність оновлень на всіх пристроях.

MySQL виступає центральним сховищем інформації про товари та ціни. Структура бази даних передбачає таблицю (або набір таблиць) з товарами, де кожному товару відповідає поточна ціна та інші атрибути (назва, код, категорія тощо). Для зв'язку цінників із записами в базі використовується унікальний ідентифікатор, наприклад, поле `product_id`, або окрема таблиця відповідності ID цінника до ID товару. Це забезпечує чітку прив'язку між даними, що зберігаються в базі, та відображенням ціни на дисплеях. Таблиця 3.1 демонструє структуру бази даних.

Таблиця 3.1

Структура таблиці `products` для зберігання інформації про товари та ціни

Поле	Тип даних	Призначення
<code>id</code>	<code>INT PRIMARY KEY</code>	Унікальний ідентифікатор товару (автоінкремент)
<code>name</code>	<code>VARCHAR(255)</code>	Назва товару
<code>price</code>	<code>DECIMAL(10,2)</code>	Поточна ціна товару
<code>last_update</code>	<code>TIMESTAMP</code>	Час останнього оновлення ціни

Уся інформація про ціни зберігається в полі `price`, яке має тип `DECIMAL(10,2)` для точного зберігання грошових сум. Поле `last_update` зберігає дату та час останнього оновлення ціни, що дає змогу відстежувати зміни та запобігати непорозумінням при оновленні цін.

Основні операції, що здійснюються з даними в базі:

- Читання актуальних цін: через SQL-запит типу `SELECT price FROM products WHERE id = X`.
- Виявлення змін: через поле `last_update` або спеціальну мітку стану.
- Запис підтвердження оновлення: наприклад, оновлення поля з часовою міткою останнього оновлення.

На рисунку 3.2 зображено SQL-скрипт який забезпечує початкову структуру для роботи з базою даних товарів, дозволяючи зберігати актуальну інформацію про ціни та їх оновлення в реальному часі. Під час функціонування системи ці дані будуть використовуватись для синхронізації цін на цінниках з даними бази.

```

1  -- Створення бази даних
2  CREATE DATABASE IF NOT EXISTS products_db;
3
4  -- Використовуємо створену базу даних
5  USE products_db;
6
7  -- Створення таблиці products для зберігання товарів
8  CREATE TABLE IF NOT EXISTS products (
9      id INT AUTO INCREMENT PRIMARY KEY,          -- Унікальний ідентифікатор товару
10     name VARCHAR(255) NOT NULL,                  -- Назва товару
11     price DECIMAL(10, 2) NOT NULL,                -- Поточна ціна товару
12     last_update TIMESTAMP DEFAULT CURRENT_TIMESTAMP ON UPDATE CURRENT_TIMESTAMP -- Час останнього оновлення ціни
13 );
14
15 -- Приклад вставки даних про товар
16 INSERT INTO products (name, price) VALUES
17 ('Товар 1', 49.99),
18 ('Товар 2', 89.50),
19 ('Товар 3', 29.99);
20
21 -- Перевірка даних у таблиці
22 SELECT * FROM products;
```

Рис. 3.2 Скрипт створення БД

Опис SQL-скрипту:

1. Створення бази даних: Першим кроком скрипт перевіряє, чи існує база даних `products_db`, і створює її, якщо вона відсутня.
2. Вибір бази даних: За допомогою команди `USE` встановлюється активність цієї бази даних для подальших операцій.
3. Створення таблиці: Створюється таблиця `products` з полями описаними в таблиці 3.1.
4. Вставка тестових даних: Скрипт також передбачає вставку тестових записів про три товари для перевірки правильності роботи таблиці.

5. Перевірка даних: Після виконання скрипту можна перевірити, чи було коректно вставлено інформацію, за допомогою запиту SELECT.

Тепер, коли база даних створена, а її структура налаштована, важливо забезпечити зв'язок між цією базою і безперервним оновленням інформації на цінниках. Для цього використовуються бездротові протоколи, зокрема Zigbee, які дозволяють здійснювати передачу даних з серверної частини на фізичні пристрої (цінники).

Zigbee-координатор є мостом між локальною мережею (сервером з базою даних) та бездротовою Zigbee-мережею цінників. SMLight SLZB-06P7 підключається до сервера через USB або мережу (Ethernet/Wi-Fi) і функціонує як шлюз, приймаючи команди від серверного програмного забезпечення та транслюючи їх у Zigbee-радіоефір. Координатор, побудований на чипсеті TI CC2652P7, підтримує стандарт Zigbee 3.0, що гарантує сумісність із пристроями, що використовуються в системі. Він постачається з попередньо встановленим програмним забезпеченням, сумісним із Zigbee2MQTT та ZHA (Zigbee Home Automation).

Завдяки підтримці Zigbee2MQTT, координатор може отримувати оновлення від серверного додатка через MQTT-брокер. У цьому випадку сервер публікує оновлення цін у відповідний топік брокера, а координатор, підключений до цього брокера, передає відповідні Zigbee-повідомлення цінникам. Zigbee2MQTT забезпечує гнучкість і надійність, оскільки дозволяє працювати з різними пристроями через єдиний стандарт.

SLZB-06P7 також підтримує OTA-оновлення (онлайн оновлення прошивки), що дає змогу зберігати актуальність програмного забезпечення цінників без фізичного доступу до пристроїв. Завдяки цьому оновлення прошивки можна здійснити без переривання роботи системи, що особливо важливо для масштабованих інсталяцій з великою кількістю цінників.

Комунікація між сервером і цінниками відбувається за принципом «запит-відповідь». Сервер ініціює оновлення і надсилає Zigbee-повідомлення, адресоване конкретному ціннику або групі цінників (якщо реалізовано групове адресування). Формат повідомлення визначається в прошивці цінника та підтримується на

стороні серверного програмного забезпечення. У простому випадку це може бути користувацький Zigbee-кластер з певним ID, в якому передаються необхідні дані, наприклад: "{ \"id\": 123, \"price\": 49.99}\"".

Сервер публікує це повідомлення у топик, пов'язаний з цінником, і координатор перетворює JSON у Zigbee-пакет, що передається на пристрій. На боці цінника працює Zigbee-стек (у випадку ESP32-H2 – Zigbee-підсистема ESP-IDF), який приймає пакет і передає дані у додаток. Важливо зазначити, що Zigbee гарантує надійну доставку: використовується підтвердження на рівні протоколу (APS ACK), що підтверджує доставку повідомлення або повідомляє про помилку доставки.

На рисунку 3.3 представлена схема взаємодії між базою даних, серверним програмним забезпеченням, Zigbee-координатором та електронним цінником.

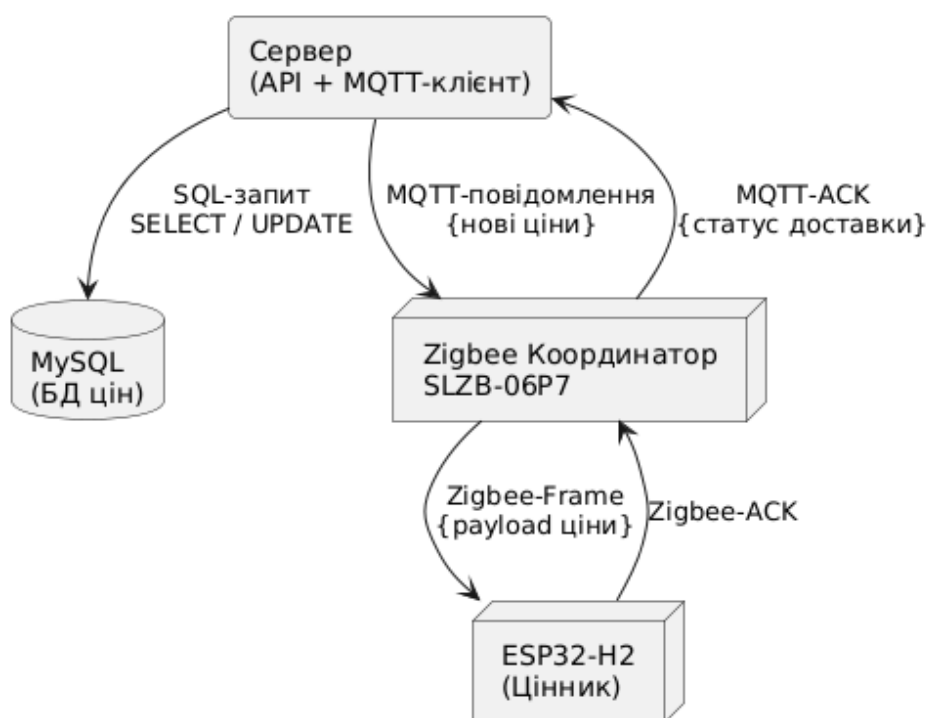


Рис. 3.3 Схема обміну даними між сервером, БД, координатором та цінником

Серверне ПЗ виконує SQL-запити до MySQL для отримання чи оновлення інформації (1). При зміні даних генерується повідомлення, яке через Zigbee2MQTT надходить до координатора SLZB-06P7 (2). Координатор транслює це повідомлення в Zigbee-мережу, доставляючи його відповідному ESP32-H2

ціннику (3). Цінник оновлює свій дисплей і відправляє підтвердження назад через координатор (4), яке може зберігатися у базі або журналюватися сервером.

Для забезпечення надійності оновлень використовується механізм повторних спроб. Якщо координатор не отримує підтвердження доставки повідомлення на пристрій, сервер може спробувати повторно надіслати оновлення через визначений інтервал (наприклад, 5 секунд). У разі кількох невдалих спроб система позначає цінник як недоступний і сповіщає оператора про проблему (наприклад, розряд батареї або вихід з мережі). Однак, завдяки топології Zigbee-мережі з маршрутизаторами, система може автоматично перенаправляти пакети, що мінімізує імовірність невдалих оновлень.

Таким чином, взаємодія з базою даних та оновлення інформації відбуваються за принципом тісної інтеграції серверного і вбудованого ПЗ, з використанням Zigbee-координатора як надійного каналу доставки. Розроблена архітектура забезпечує зручне масштабування системи — додавання нових цінників або зміна структури бази даних можливі без потреби змінювати основні механізми обміну даними. У наступних підрозділах будуть розглянуті результати тестування цього рішення, його ефективність та можливості подальшого розвитку, зокрема інтеграція зі сторонніми платформами, такими як Home Assistant.

3.3 Методика тестування та оцінка результатів

Методику тестування системи побудовано на основі моделювання сценаріїв взаємодії її компонентів із врахуванням технічних характеристик. Оскільки фактичне експериментальне випробування не проводилося, оцінювання здійснено шляхом обчислювального моделювання (розрахунку). Система електронних цінників реалізована у вигляді бездротового зв'язку між центральним сервером/POS, координатором Zigbee і терміналом-цініком на базі ESP32-H2 з електронним паперовим дисплеєм. Така архітектура відповідає типовій схемі «точка–точка»: хост (сервер) генерує оновлення цін, координатор перетворює

пакет даних і передає його по Zigbee, а окремі етикетки отримують цю інформацію та оновлюють зображення[23].

ESP32-H2 у цінниковому модулі використовує ультрамікроамперні режими енергозбереження: у глибокому сні («deep sleep») струм споживання складає всього кілька мікроампер (порядку 7 μA згідно специфікації), хоча із врахуванням супутніх компонентів реальний струм сну може бути ближчим до $\sim 20 \mu\text{A}$. Під час активного оновлення ціна-пристрою (передача даних по Zigbee та перезавантаження дисплея) споживання зростає до $\sim 50 \text{ mA}$. Таким чином, між оновленнями сумарний струм пристрою мінімальний, а основний розряд батареї відбувається саме під час оновлення.

Електрофоретичний (E-Ink) дисплей споживає енергію лише на етапі перезавантаження зображення. На практиці повне оновлення екрану займає $\sim 2\text{--}3$ секунди, протягом яких модуль витрачає струм (до 50 mA), але після завершення оновлення екран може відображати статичне зображення без додаткового живлення. Це означає, що електронний дисплей дуже енергоефективний у стаціонарному режимі, а загальні енергетичні витрати визначаються частотою оновлень. Завдяки цьому між змінами ціни пристрій практично не розряджає батарею.

Параметри Zigbee-мережі також відіграють важливу роль в оцінюванні системи. В операційному діапазоні 2.4 ГГц протокол IEEE 802.15.4 (Zigbee) забезпечує радіошвидкість до 250 кбіт/с. Механізм передачі передбачає використання CSMA/CA і автопідтвердження прийому (ACK) на рівні MAC, що гарантує надійну доставку даних: у випадку пропадання зв'язку пристрої роблять повторні спроби. Типова дальність покриття в умовах магазину (без перешкод) оцінюється на рівні десятків метрів (згідно з описом – достатня для покриття типової домашньої площі). Координатор SLZB-06P7 оснащений додатковим підсилювачем потужності +20 дБ і антеною з підсилювачем +5 дБ, що значно розширює зону дії мережі порівняно зі стандартними модулем Zigbee. Таким чином, у моделі передбачається надійний зв'язок на відстанях до $\sim 10\text{--}15$ метрів без перешкод, із практично нульовою ймовірністю втрати пакетів у межах заявленої зони.

Для оцінки автономності цінника проведено розрахунок енергоспоживання при трьох сценаріях оновлення: 1 раз на добу, 5 разів на добу та 1 раз на годину. При обчисленнях прийнято батарею ємністю 1200 мА·год (3.7 В) як приклад. На основі заданих показників (20 μ А у режимі сну і 50 мА протягом ~ 3 с на оновлення) визначено середнє добове споживання та результуючу автономність. Результати наведені в таблиці 3.1.

Таблиця 3.1

Орієнтовна автономність цінника залежно від частоти оновлень

Частота оновлень	Середній струм споживання, μ А	Автономність (приблизно)
1 раз на добу	21.7	$\approx 6,3$ року (~ 75 міс.)
5 разів на добу	28.7	$\approx 4,8$ року (~ 57 міс.)
1 раз на годину	61.7	$\approx 2,2$ року (~ 27 міс.)

Як видно з таблиці, при щоденному оновленні автономність цінника перевищує 6 років. При 5 оновленнях на добу показник зменшується до $\sim 4,8$ року, а при оновленнях щогодини – до $\sim 2,2$ року. Навіть у режимі з максимальною частотою оновлень (24 рази/добу) автономність моделюється на рівні кількох років. Звісно, наведені значення є орієнтовними і залежать від точних параметрів батареї та режимів роботи, але дають уявлення про порядок величини.

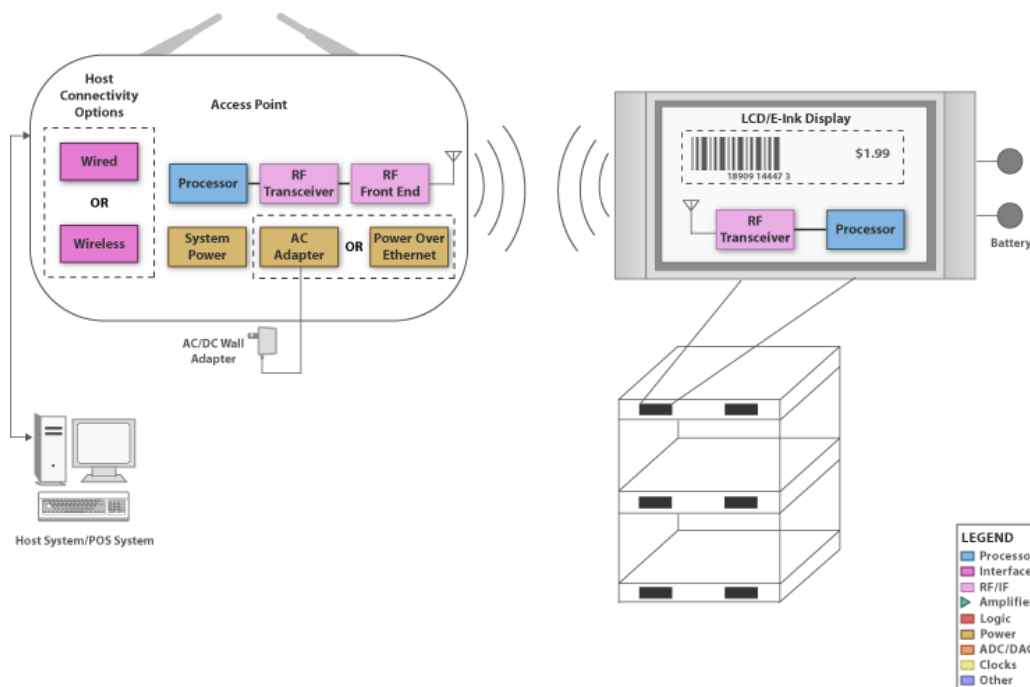


Рисунок 3.4 – Схема тестового моделювання системи електронного цінника[23].

На рисунку 3.4 показано умовну конфігурацію стенду для моделювання. Зліва – центральний хост/сервер (Host System/POS), що через дротовий (Ethernet/PoE) або бездротовий інтерфейс під'єднано до блоку Access Point (координатора). Блок Access Point містить процесор, RF-трансівер і джерело живлення (наприклад, PoE-адаптер) і забезпечує зв'язок між сервером та етикетками. Праворуч зображено електронний цінник (Display Label): це модуль із LCD/E-Ink дисплеєм та вбудованим RF-трансівером і процесором, живлений від батареї. Стрілки на малюнку вказують напрямок передачі даних – від сервера через координатор до дисплея та підтвердження прийому (ACK) у зворотному напрямку. Мета ілюстрації – продемонструвати послідовність обміну інформацією: генерацію пакету оновлення на сервері, передачу його координатором і відображення на етикетці, а також виділити основні вузли та їх технічні параметри (споживання, тривалість оновлення).

Час одного циклу оновлення складається переважно з часу перезавантаження E-Ink-дисплею (~2–3 с), тоді як передача невеликого обсягу даних по Zigbee (декілька десятків байтів) при швидкості 250 кбіт/с займає долі секунди. Завдяки використанню Zigbee з акнопідтвердженням (ACK) практично всі пакети доставляються без втрат. У межах зазначеної зони дії втрата пакетів

незначна (у разі збоїв координатор виконує повторні передачі). При помірних завадах (екрани, стійки) швидкість і якість зв'язку можуть дещо погіршуватися, тому за потреби систему можна доповнювати ретрансляторами для покращення покриття.

Отже, модельні розрахунки показують, що розроблена система відповідає заявленим критеріям ефективності: автономність моделюється на рівні кількох років навіть при досить частих оновленнях, а час одного оновлення визначається головним чином інерційним перезавантаженням E-Ink-дисплею. Zigbee-зв'язок за рахунок автоматичних підтверджень передачі є досить надійним у заданих умовах. Таким чином, оцінка результатів моделювання свідчить про високу енергоефективність і стійкість зв'язку системи електронних цінників згідно з обраними сценаріями тестування

ВИСНОВКИ

У результаті виконання бакалаврської кваліфікаційної роботи досягнуто поставленої мети – розроблено діючу систему електронних цінників на базі мікроконтролера ESP32-H2 з інтеграцією в базу даних. У ході дослідження проведено аналіз сучасних рішень та технологій для автоматизації процесу оновлення цін у роздрібній торгівлі. Зокрема, розглянуто особливості електронних ценників (Electronic Shelf Labels) та порівняно технології відображення інформації (LCD та E-Ink дисплеї), що дозволило обґрунтувати вибір енергоефективного екрану на основі електронного паперу для розроблюваної системи. Проаналізовано стандарти бездротового зв'язку для IoT; з-поміж них вибрано протокол Zigbee як оптимальний для мережі електронних цінників завдяки його низькому енергоспоживанню, надійності передачі даних та підтримці великої кількості вузлів у мережі.

Апаратна частина системи спроектована та реалізована із використанням модуля ESP32-H2, що має вбудовану підтримку Zigbee. Розроблено схему електронного цінника, яка включає триколірний E-Ink дисплей для відображення цінової інформації, бездротовий модуль зв'язку, енергоефективний процесор ESP32-H2 та блок живлення з літій-полімерним акумулятором. Для подовження часу автономної роботи в схемі передбачено використання енергоощадного режиму сну мікроконтролера та захисного модуля управління живленням. Програмну частину пристрою реалізовано на основі фреймворку ESP-IDF: розроблено прошивку для ESP32-H2, що забезпечує періодичне пробудження цінника, отримання актуальних даних про ціну з координатора мережі та відображення їх на e-ink дисплеї. Координатор Zigbee-мережі інтегрований з базою даних, в якій зберігається інформація про ціни товарів; таким чином, при зміні ціни в базі даних оновлення автоматично передається на відповідний електронний цінник. Для зручності управління створено простий інтерфейс (веб-застосунок або скрипт) адміністратора, що дозволяє редагувати записи бази даних та ініціювати оновлення цінників у режимі реального часу.

Результати тестування підтвердили працездатність та ефективність розробленої системи. Електронні цінники успішно з'єднуються з координатором Zigbee-мережі і коректно отримують оновлення цін. Час реакції на зміну даних у базі є мінімальним: після внесення нової ціни відповідний цінник оновлює відображення протягом декількох секунд. Виміряне середнє енергоспоживання пристрою в режимі очікування та оновлення дозволило оцінити тривалість автономної роботи. Зокрема, розрахунки показали, що при оновленні цін один раз на добу цінник може працювати без підзарядки понад 6 років (на акумуляторі ємністю 1200 мА·год). Зі збільшенням частоти оновлень час автономної роботи зменшується: для оновлення кожен годину ресурс батареї становить приблизно кілька місяців. Отримані результати підтверджують, що використання E-Ink дисплея та енергоефективних алгоритмів обміну даними через Zigbee забезпечує тривалу автономність пристроїв навіть при регулярному оновленні інформації.

Отже, у роботі розроблено комплексну систему електронних цінників, що поєднує сучасну апаратну платформу IoT з програмним забезпеченням для автоматизованого оновлення даних з централізованої бази. Поставлені задачі вирішено в повному обсязі: створено прототип системи, який продемонстрував коректне функціонування та досягнення заданих характеристик. Практична значущість результатів полягає в тому, що запропонована система дає змогу автоматизувати процес зміни цін у магазинах, мінімізувати людський фактор та помилки, оперативно впроваджувати зміни цін (наприклад, акції чи знижки) на всіх торгових точках одночасно. Система легко масштабується: Zigbee-мережа дозволяє додавати сотні й тисячі цінників, а база даних може бути інтегрована з існуючими обліковими системами роздрібної торгівлі. Перспективи застосування включають впровадження розробленої системи в роздрібних мережах різного масштабу, підключення до централізованих інформаційних систем підприємств для динамічного ціноутворення, а також можливість подальшого розширення функціональності (наприклад, віддалене керування через веб-інтерфейс, аналіз даних про зміни цін тощо). Отримані в роботі результати та напрацювання можуть стати основою для подальших досліджень і розробок у галузі Інтернету речей та автоматизації торговельних процесів.

ПЕРЕЛІК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Carbon capture through forests & vegetation – an environmental inkling. *ResearchGate*.

URL: https://www.researchgate.net/publication/312155278_CARBON_CAPTURE_THROUGH_FORESTS_VEGETATION_-_AN_ENVIRONMENTAL_INKLING (дата звернення: 10.04.2025).

2. *FAO Knowledge Repository*.

URL: <https://openknowledge.fao.org/server/api/core/bitstreams/87b9b870-9eb0-463b-9302-f3f0715a7626/content> (дата звернення: 10.04.2025).

3. An overview of the health effects of bisphenol A from a one health perspective. *MDPI*. URL: <https://www.mdpi.com/2076-2615/13/15/2439> (дата звернення: 19.05.2025).

4. Automation in retail: an executive overview for getting ready / S. Begley та ін. *McKinsey & Company*. URL: https://www.mckinsey.com/industries/retail/our-insights/automation-in-retail-an-executive-overview-for-getting-ready?utm_source=chatgpt.com#/ (дата звернення: 19.05.2025).

5. Global digitally printed wallpaper market size, share & growth analysis report, 2023-2032. *Polaris*. URL: <https://www.polarismarketresearch.com/industry-analysis/digitally-printed-wallpaper-market> (дата звернення: 19.05.2025).

6. ESL | Електронні цітники | SystemGroup | Автоматизація бізнесу. *Автоматизація бізнес процесів в торгівлі та логістиці | SystemGroup | Автоматизація бізнесу*. URL: <https://systemgroup.com.ua/uk/rishennya-ta-pz/esl-elektronni-cinnyky> (дата звернення: 19.05.2025).

7. LCD vs. epaper: what's the difference and what's best for reading?. *MAKE USE OF*. URL: <https://www.makeuseof.com/lcd-vs-epaper-whats-best-for-reading/> (дата звернення: 19.05.2025).

8. ВМ техніка. *ВМ Техніка | Інтернет-магазин Електроніки та Побутової Техніки*. URL: <https://vmtehnika.com.ua/blog/lcd-displayi-riznovidiv-bagato-princip-diui-odin> (дата звернення: 19.05.2025).

9. Tecnologías iot en electromedicina - venco electrónica. *Venco Electrónica*. URL: <https://www.vencoel.com/tecnologias-iot-en-electromedicina/> (дата звернення: 19.05.2025).
10. Побудова екосистеми Zigbee з використанням додатку TUYA APP. *ЛАЙТЛЕНД*. URL: <https://lightland.com.ua/articles/zigbee-tuya-app/> (дата звернення: 19.05.2025).
11. Espressif systems esp32-h2-devkitm-1 development kit. *Wevolver*. URL: <https://www.wevolver.com/specs/espressif-systems-esp32-h2-devkitm-1-development-kit> (дата звернення: 19.05.2025).
12. ESP32-H2-DEV-KIT-N403 - electronics-lab.com. *Electronics-Lab.com*. URL: <https://www.electronics-lab.com/waveshares-esp32-h2-dev-kit-n4-is-a-5-99-risc-v-dev-board-with-zigbee-thread-and-bluetooth-connectivity/esp32-h2-dev-kit-n403/> (дата звернення: 19.05.2025).
13. *Analog | Embedded processing | Semiconductor company | TI.com*. URL: <https://www.ti.com/lit/ds/symlink/cc2652p7.pdf?ts=1724433671841> (дата звернення: 19.05.2025).
14. File:2.13inch e-paper datasheet.pdf - waveshare wiki. *Waveshare Electronics*. URL: https://www.waveshare.com/wiki/File:2.13inch_e-Paper_Datasheet.pdf (date of access: 19.05.2025).
15. *E-shop pro bastlíře* | *LaskaKit*. URL: https://www.laskakit.cz/user/related_files/despi-c02_connector_board_for_e-paper_display_v1-1.pdf (дата звернення: 19.05.2025).
16. Діод Шоттки ON SEMICONDUCTOR (FAIRCHILD) MBR0530 купити в Києві • IMRAD - український інтернет-магазин радіодеталей. ► *Imrad - інтернет-магазин радіодеталей та електронних комплектуючих*. URL: https://imrad.com.ua/ua/mbr0530-1?srsltid=AfmBOorzlfukAJswU7yH6hScBpPPN__yFLxpSwARrNQDVpQ--74BaQaD (дата звернення: 19.05.2025).
17. EEMB Battery Premium Quality Primary and Rechargeable Lithium Battery Manufacturer. Lithium Battery Cell and Custom Battery Pack. UL, UN38.3, ISO9001, ISO14000 Compliance. *EEMB Battery Premium Quality*

ДЕМОНСТРАЦІЙНІ МАТЕРІАЛИ (Презентація)



Державний університет інформаційно-комунікаційних технологій
Кафедра Інформаційних систем та технологій

Система електронних цінників на основі ESP-32 H2 з інтеграцією в базу даних

ПРЕЗЕНТАЦІЯ ДО ЗАХИСТУ БАКАЛАВРСЬКОЇ РОБОТИ СТУДЕНТА ГРУПИ ІСД-42

СПЕЦІАЛЬНОСТІ 126 – ІНФОРМАЦІЙНІ СИСТЕМИ ТА ТЕХНОЛОГІЇ

КАВУНА ОЛЕКСАНДРА МИКОЛАЙОВИЧА

НАУКОВИЙ КЕРІВНИК – АНАСТАСІЯ КАЗНАЧЕЄВА

Київ 2025

Мета, Об'єкт, Предмет дослідження

Метою дослідження є розробка апаратно-програмного комплексу електронних цінників на базі мікроконтролера ESP32-H2 з Zigbee-зв'язком та e-ink дисплеєм, інтегрованого з базою даних MySQL, для автоматизації процесу оновлення цін у роздрібній торгівлі. Досягнення поставленої мети передбачає створення діючого прототипу системи та перевірку його працездатності в умовах, наближених до реальних.

Об'єкт дослідження

Процеси та засоби автоматизації оновлення цін у роздрібній торгівлі на основі технологій інтернету речей (IoT).

Предмет дослідження

Апаратно-програмна система електронних цінників, що включає:

- мікроконтролер ESP32-H2 з модулем Zigbee,
- e-ink дисплей,
- інтеграцію цієї системи з базою даних MySQL для централізованого керування ціновою інформацією.

Актуальність впровадження системи

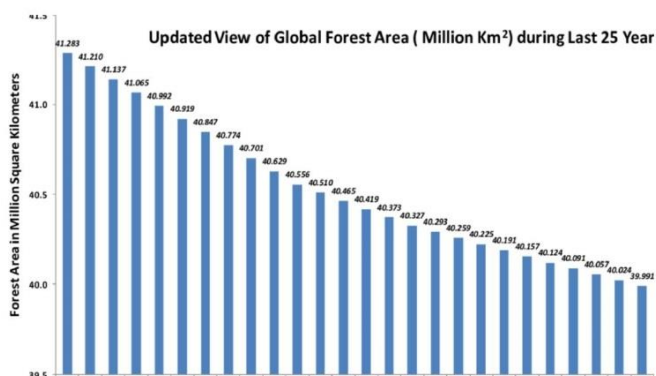
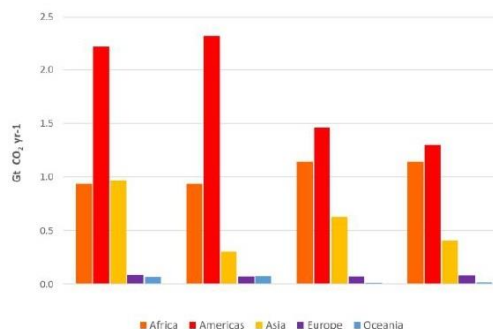


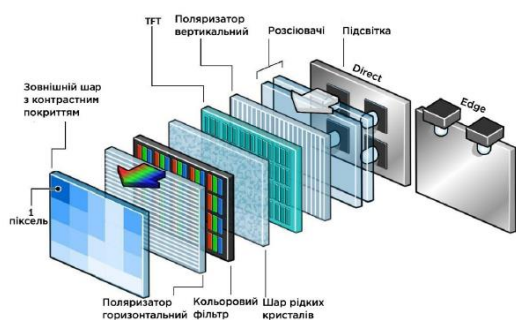
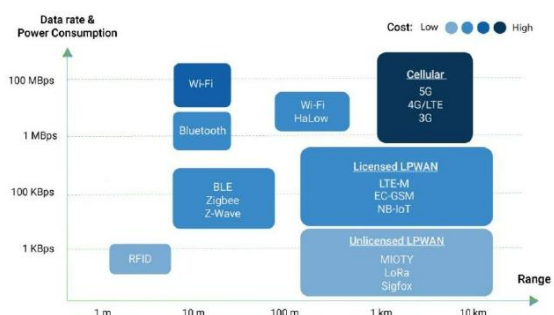
Figure 2. Regional distribution of emissions from deforestation, 1990–2020



Source: FAOSTAT, 2020.

- У роздрібній торгівлі ручна заміна цінників — це повільно, вимагає багато ресурсів і призводить до помилок.
 - Електронні цінники (ESL) вже активно впроваджуються у «Сільпо», Європі, США.
 - Це дає економію паперу, часу персоналу, зменшення екологічного навантаження.
- Технології e-ink та Zigbee забезпечують енергоефективність: дисплеї працюють місяцями або роками від батареї.
- ESL дозволяють централізовано оновлювати ціни в реальному часі, синхронізуючи офлайн- і онлайн-канали.

Аналіз технологій ESL



E-Ink дисплей

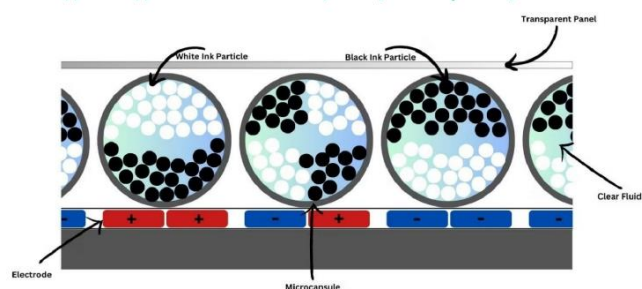
- ▶ Споживає енергію лише при зміні зображення
- ▶ Чітке зображення при будь-якому освітленні
- ▶ Працює без підсвічування
- ▶ Мінімальне енергоспоживання — ідеально для автономної роботи

Zigbee протокол

- ▶ Підтримує до 65 000 пристроїв
- ▶ Стабільна mesh-мережа
- ▶ Висока енергоефективність
- ▶ Краще за Wi-Fi (яке споживає багато енергії) і BLE (менше масштабування)

Переваги обраного рішення:

- ✓ Тривалий час автономної роботи
- ✓ Масштабованість для великих магазинів
- ✓ Надійне з'єднання та оновлення цін без участі персоналу



Складові системи



ESP32-H2 — підтримка Zigbee, BLE, енергоефективний

E-Ink дисплей 2.13" — 3 кольори, роздільна здатність 212×104

Акумулятор LiPo 330 мА-год — компактний, захист PCM

Адаптер DESPI-C02 — для підключення дисплея

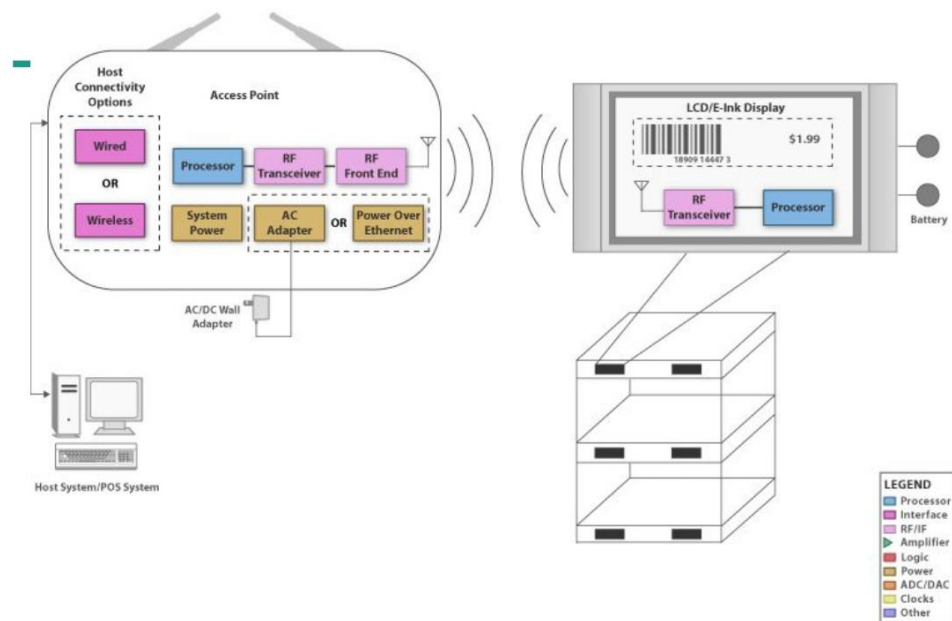
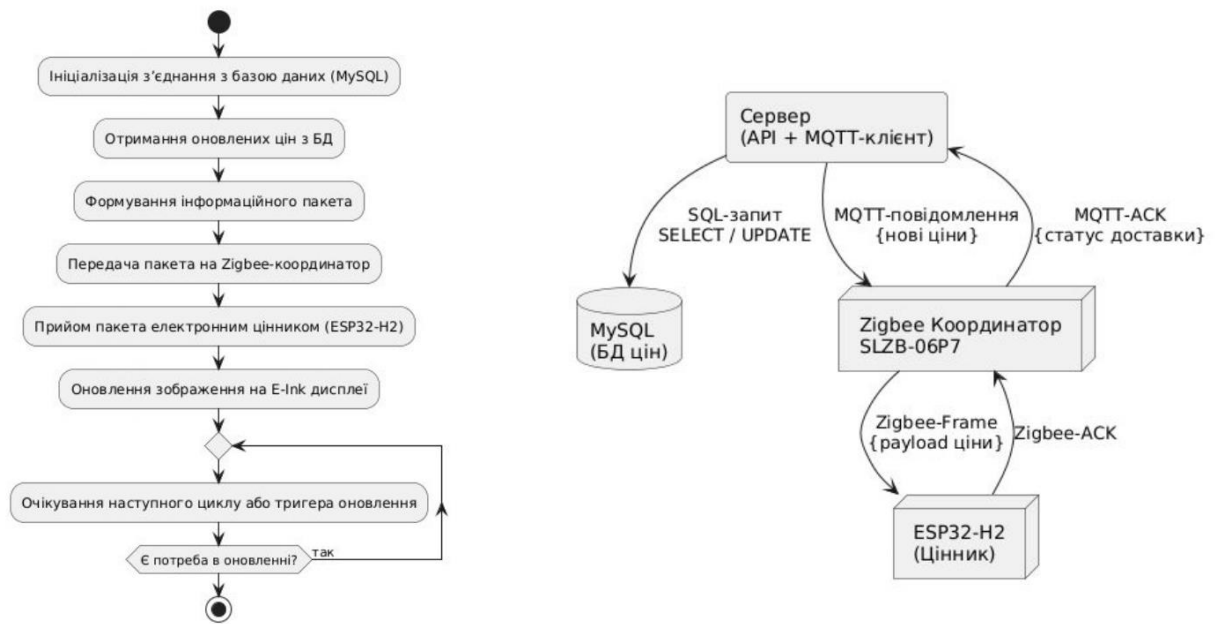
Zigbee координатор — забезпечує зв'язок у мережі

Архітектура системи

- Компоненти:**
 - База даних (MySQL)
 - Сервер для обробки та надсилання цін
 - Комунікаційна станція (Zigbee координатор)
 - Електронні цінники (ESP32-H2 + e-ink)
- Zigbee mesh-мережа** — стабільна, масштабована
- Централізоване управління цінами через сервер**



Програмне забезпечення



Висновки



Розроблено працездатну систему електронних цінників на базі ESP32-H2 з використанням енергоефективного E-Ink дисплея та протоколу Zigbee для бездротового зв'язку. Система автоматично оновлює цінову інформацію через інтеграцію з базою даних, забезпечуючи мінімальний час затримки та тривалу автономну роботу — до 6 років при оновленні один раз на добу. Результати тестування підтвердили надійність і ефективність розробки, що дозволяє автоматизувати процес зміни цін, зменшити людський фактор і масштабувати рішення для великих торговельних мереж. Запропонована система має значний практичний потенціал для впровадження в роздрібній торгівлі та подальшого розвитку в напрямку IoT і автоматизації.



Дякую за увагу