**ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ ІНФОРМАЦІЙНО-КОМУНІКАЦІЙНИХ ТЕХНОЛОГІЙ**
**НАВЧАЛЬНО-НАУКОВИЙ ІНСТИТУТ ІНФОРМАЦІЙНИХ ТЕХНОЛОГІЙ**
**КАФЕДРА КОМП'ЮТЕРНОЇ ІНЖЕНЕРІЇ**

# КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

на тему: «Система «Розумний будинок» на основі мікроконтролера Cortex M4»

на здобуття освітнього ступеня магістр
за спеціальності 123 Комп'ютерна інженерія
освітньо-професійної програми «Комп'ютерні системи та мережі»

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

_____ Артем ВОЛІН

Виконав: здобувач вищої освіти гр.КСДМ-62
Артем ВОЛІН
Керівник: Кирило СОКОЛОВ
*PhD*
Рецензент: _____
,

**Київ 2025**

**ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ**
**ІНФОРМАЦІЙНО-КОМУНІКАЦІЙНИХ ТЕХНОЛОГІЙ**

**Навчально-науковий інститут Інформаційних технологій**

Кафедра Комп'ютерна інженерія
Ступінь вищої освіти магістр
Спеціальність 123 Комп'ютерна інженерія
Освітньо-професійна прорама «Комп'ютерні системи та мережі»

**ЗАТВЕРДЖУЮ**
Завідувач кафедри
Комп'ютерної інженерії
_____ Наталія ЛАЩЕВСЬКА

"____" _____2025 року

**З А В Д А Н Н Я**
**НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ**

Воліну Артему Валерійовичу

1.Тема кваліфікаційної роботи: Система «Розумний будинок» на основі мікроконтролера Cortex M4
керівник кваліфікаційної роботи Кирило СОКОЛОВ PhD

затверджені наказом Державного університету інформаційно-комунікаційних технологій від "30" жовтня 2025р. № 467

2. Строк подання кваліфікаційної роботи «26» грудня 2025 р.
3. Вихідні дані кваліфікаційної роботи:
   1. Науково-технічна література.
   2. Система «розумний будинок».
   3. Мікропроцесор Cortex m4.
   4. MIT App Inventor.

4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити):
   1. Огляд загальних положеннь, актуальних тенденції формування та розвитку ринку систем «розумний будинок»;
   2. Дослідженя особливостей, технічних характеристик мікропроцесора Cortex M4 та засобів реалізації системи.
.

3. Практична реалізація домашнього центру керування із застосуванням STM32.

5. Перелік ілюстраційного матеріалу: *презентація*

1. Мета та завдання роботи.
2. Тенденції споживачів у сфері розумного дому.
3. Аналіз розміру, частки та тенденцій світового ринку розумного дому.
4. Глобальна статистика технологій розумного дому.
5. Аналіз сімейства процесорів Cortex-M.
6. Огляд технічних особливостей мікроконтролера stm32 Cortex-M4
7. Огляд протоколів домашньої автоматизації та застосування Cortex-M та Інтернет речей.
8. Дослідження особливостей системи, апаратних складових.
9. Огляд схеми проекту.
10. Розробка додатку для Android.
11. Висновки.

6. Дата видачі завдання «30» жовтня 2025р.

**КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН**

| № з/п | Назва етапів кваліфікаційної роботи | Строк виконання етапів роботи | Примітка |
|---|---|---|---|
| 1. | Підбір літератури по тематиці роботи | 30.10.25-04.11.25 | Виконано |
| 2. | Огляд загальних положеннь та розвитку ринку систем «розумний будинок» | 04.11.25-12.11.25 | Виконано |
| 3. | Дослідженя особливостей, технічних характеристик мікропроцесора Cortex M4 | 12.11.25-19.11.25 | Виконано |
| 4. | Практична реалізація домашнього центру керування із застосуванням STM32 | 19.11.25-26.11.25 | Виконано |
| 5 | Оформлення роботи: вступ, висновки, реферат | 26.11.25-04.12.25 | Виконано |
| 6 | Розробка демонстраційних матеріалів | 04.12.25-10.12.25 | Виконано |
| 7 | Попередній захист роботи | 10.12.25-23.12.25 | Виконано |

Здобувач вищої освіти _____ Артем ВОЛІН
*( підпис )*

Керівник кваліфікаційної роботи _____ Кирило СОКОЛОВ
*(підпис )*

# РЕФЕРАТ

Текстова частина кваліфікаційної роботи на здобуття освітнього ступеня магістра: 87 стор., 6 табл., 62рис., 32 джерела.

*Мета роботи* – розробка системи керування «Розумним будиноком» із застосуванням мікроконтролера Cortex M4.

*Об'єкт дослідження* – процес створення системи керування «Розумний будинок».

*Предмет дослідження* – система управління «Розумний будинк».

У роботі використано різноманітні методи, такі як метод системного підходу, методи порівняльного та структурно-функціонального аналізу, методи моделювання, верифікації та тестування

У першому розділі розглянуто загальні положення та сучасні тенденції розвитку ринку систем «Розумний будинок». Проаналізовано споживчі вподобання, глобальний обсяг і динаміку ринку, регіональні особливості та ключових учасників галузі. Також представлено переваги домашньої автоматизації та перспективи зростання технологій розумного дому.

Другий розділ присвячено  дослідженню технічні основи побудови систем розумного дому, зокрема особливості сімейства процесорів ARM і Cortex-M, технічні характеристики мікроконтролера STM32 Cortex-M4, його роль в Інтернеті речей та огляд основних протоколів домашньої автоматизації.

У практичній частинівиконано реалізацію домашнього центру керування на основі STM32: розглядається вибір програмного середовища, аналіз апаратної частини та способів підключення модулів, структура електричної схеми проєкту та розроблення Android-додатку для керування системою.

КЛЮЧОВІ СЛОВА: ІНТЕРНЕТ РЕЧЕЙ, РОЗУМНИЙ БУДИНОК, ANDROID, ДОДАТОК, МІКРОКОНТРОЛЕР, АПАРАТНІ СКЛАДОВІ, СИСТЕМА, АРХІТЕКТУРА, ПРОТОКОЛ, ТЕХНОЛОГІЯ.

## ABSTRACT

Text part of the qualification work for obtaining a master's degree: 87 pages, 6 tables, 62 figures, 32 sources.

The purpose of the work is to develop a "Smart Home" control system using the Cortex M4 microcontroller.

The object of the study is the process of creating a "Smart Home" control system.

The subject of the study is the "Smart Home" control system.

The work uses various methods, such as the System Approach Method, methods of comparative and structural-functional analysis, methods of modeling, verification and testing

The first section considers the general provisions and current trends in the development of the "Smart Home" systems market. Consumer preferences, global market volume and dynamics, regional features and key industry participants are analyzed. The advantages of home automation and the prospects for the growth of smart home technologies are also presented.

The second section is devoted to the study of the technical foundations of building smart home systems, in particular the features of the ARM and Cortex-M processor families, the technical characteristics of the STM32 Cortex-M4 microcontroller, its role in the Internet of Things and an overview of the main home automation protocols.

In the practical part, the implementation of a home control center based on STM32 is carried out: the choice of the software environment, analysis of the hardware and methods of connecting modules, the structure of the electrical circuit of the project and the development of an Android application for controlling the system are considered.



KEYWORDS: INTERNET OF THINGS, SMART HOME, ANDROID, APPLICATION, MICROCONTROLLER, HARDWARE COMPONENTS, SYSTEM, ARCHITECTURE, PROTOCOL, TECHNOLOGY.

**ЗМІСТ**

ВСТУП……9
1 ЗАГАЛЬНІ ПОЛОЖЕННЯ ТА АКТУАЛЬНІ ТЕНДЕНЦІЇ ФОРМУВАННЯ ТА РОЗВИТКУ РИНКУ СИСТЕМ «РОЗУМНИЙ БУДИНОК»……...11
1.1 Тенденції споживачів у сфері розумного дому……...11
1.2 Аналіз розміру, частки та тенденцій світового ринку розумного дому…16
1.3 Регіональний аналіз ринку систем «розумний дім» та визначення провідних учасників галузі……19
1.4 Огляд переваг автоматизації розумного дому……22
1.5 Глобальна статистика технологій розумного дому……25
2 ДОСЛІДЖЕНЯ ОСОБЛИВОСТЕЙ, ТЕХНІЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК МІКРОПРОЦЕСОРА CORTEX M4 ТА ЗАСОБІВ РЕАЛІЗАЦІЇ СИСТЕМИ……38
2.1 Дослідження сімейство процесорів ARM……...38
2.2 Аналіз сімейства процесорів Cortex-M……...40
2.3 Огляд технічних особливостей мікроконтролера STM32 Cortex-M4…..47
2.4. Застосування Cortex-M та Інтернет речей……..55
2.5 Огляд протоколів домашньої автоматизації……60
3 ПРАКТИЧНА РЕАЛІЗАЦІЯ ДОМАШНЬОГО ЦЕНТРУ КЕРУВАННЯ ІЗ ЗАСТОСУВАННЯМ STM32……..69
3.1 Огляд та вибір середовища розробки додатків керування……69
3.2 Дослідження особливостей системи, апаратних складових та процес їх підключення……72
3.3 Огляд схеми проекту……82
3.4 Розробка додатку для Android……..91
ВИСНОВКИ……94
ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ……...96
ДЕМОНСТРАЦІЙНІ МАТЕРІАЛИ (Презентація)……100

# ВСТУП

*Актуальність теми.* Стрімкий розвиток цифрових технологій, поширення мобільних пристроїв та зростання популярності концепції Інтернету речей (IoT) суттєво трансформують підходи до організації житлового простору. Системи «розумного дому» перестають бути елементом інновацій для вузького кола користувачів і перетворюються на важливий компонент сучасної інфраструктури житла. Вони забезпечують автоматизацію освітлення, опалення, безпеки, моніторингу стану приміщень і значно підвищують рівень комфорту, енергоефективності та керованості домашніх систем.

Паралельно зростає потреба у створенні надійних, доступних і гнучких апаратно-програмних рішень, здатних інтегрувати різноманітні датчики, виконавчі пристрої та засоби зв’язку. Мікроконтролери STM32 на базі ядра Cortex-M4 посідають важливе місце серед інструментів для побудови таких систем завдяки високій продуктивності, енергоефективності та широкій підтримці протоколів взаємодії.

Незважаючи на значний розвиток ринку, існує потреба в комплексних дослідженнях, які поєднують теоретичний аналіз сучасних тенденцій розумного житла, технічне вивчення апаратних засобів та практичну реалізацію прототипів систем керування. Створення власного центру управління на основі STM32 та розроблення мобільного застосунку для взаємодії з ним має високу практичну цінність, оскільки демонструє реальний механізм інтеграції IoT-технологій у побут і може бути використане як основа для подальших наукових та інженерних розробок.

Таким чином, тема роботи є актуальною, оскільки відповідає сучасним тенденціям цифровізації житлового сектору, потребам у доступних рішеннях домашньої автоматизації та запитам на розвиток інтелектуальних систем керування.

*Мета роботи* – розробка системи керування «Розумним будиноком» із застосуванням мікроконтролера Cortex M4.

Для досягнення мети, у магістерській роботі успішно виконано наступні завдання:

- огляд загальних положеннь, актуальних тенденції формування та розвитку ринку систем «розумний будинок»;

- дослідженя особливостей, технічних характеристик мікропроцесора cortex m4 та засобів реалізації системи;

- практична реалізація домашнього центру керування із застосуванням STM32.

*Об'єкт дослідження* – процес створення системи керування «Розумний будинок».

*Предмет дослідження* – система управління «Розумний будинк».

*Методи дослідження.* Під час виконання магістерського дослідження застосовувалися метод системного підходу, методи порівняльного та структурно-функціонального аналізу, методи моделювання, верифікації та тестування

*Наукова новизна отриманих результатів.* Наукова новизна роботи полягає у створенні узагальненої моделі домашнього центру керування на базі мікроконтролера STM32 Cortex-M4. У роботі запропоновано структурний підхід до інтеграції апаратних модулів із програмним забезпеченням, а також обґрунтовано вибір ефективних протоколів взаємодії в IoT-системах

*Практична значущість отриманиxx результатів.* Практична значущість полягає у створенні працездатного прототипу системи керування «розумним домом» та розробці Android-додатку для її віддаленого контролю. Отримані результати можуть бути використані для подальшого вдосконалення IoT-рішень, навчальних проєктів, а також при розробці реальних систем домашньої автоматизації.

*Апробація результатів та публікації.* Ключові напрацювання та підсумки магістерського дослідження були презентовані під час наукової конференції, що відбулася на базі Державного університету телекомунікацій та інформаційно-комунікаційних технологій.

# 1 ЗАГАЛЬНІ ПОЛОЖЕННЯ ТА АКТУАЛЬНІ ТЕНДЕНЦІЇ ФОРМУВАННЯ ТА РОЗВИТКУ РИНКУ СИСТЕМ «РОЗУМНИЙ БУДИНОК»

## 1.1 Тенденції споживачів у сфері розумного дому

Пристрої для розумного дому є дуже бажаними функціями на сучасному ринку нерухомості. Покупці житла та орендарі шукають розумніші будинки, які пропонують більше зручності, водночас заощаджуючи їм час і гроші. У досліженні розглядалося, як зростало використання технологій розумного дому минулого року. Дане дослідження – це погляд на те, як людина зараз ставляться до пристроїв розумного дому. Розглянуто, які пристрої люди хочуть найбільше, які головні переваги вони бажають отримати та як пандемія вплинула на їхнє використання технологій розумного дому.

Виконуючи огляд зроблено наступні висновки, а саме:

- 7 з 10 покупців житла шукають розумний дім, а 78% готові платити більше за будинок з розумними пристроями;

- більшість домовласників використовують розумні пристрої для зручності та економії часу, далі йдуть безпека та захист.

- через події, які відбуваються, двоє з трьох людей більше хотіли мати пристрій для розумного дому, і саме пристрої, пов'язані з безпекою, були тими, які люди найчастіше хотіли. Жінки майже вдвічі частіше, ніж чоловіки, хотіли мати розумну сигналізацію.

Від термостатів до дверних замків, ринок технологій насичений багатьма різними типами пристроїв для розумного дому. Кожен пристрій і бренд мають свої можливості та обмеження. Найголовніше, що здатність пристрою інтегруватися з майбутніми пристроями є величезним фактором, який потрібно враховувати, коли ви хочете налаштувати довговічну домашню автоматизацію за допомогою пристроїв розумного дому. Вам потрібні пристрої та бренди, які можуть інтегруватися з тим, що зараз є на ринку, та з пристроями, які ще не випущені [1].

Але як дізнатися, які пристрої зможуть інтегруватися з технологіями розумного дому майбутнього. Розуміння того, що популярно, – чудова відправна точка. Популярні пристрої й надалі отримуватимуть підтримку з майбутніх релізів, щоб не блокувати потенційних покупців. Ось найпопулярніші пристрої, які покупці житла хочуть бачити сьогодні, рис.1.1.

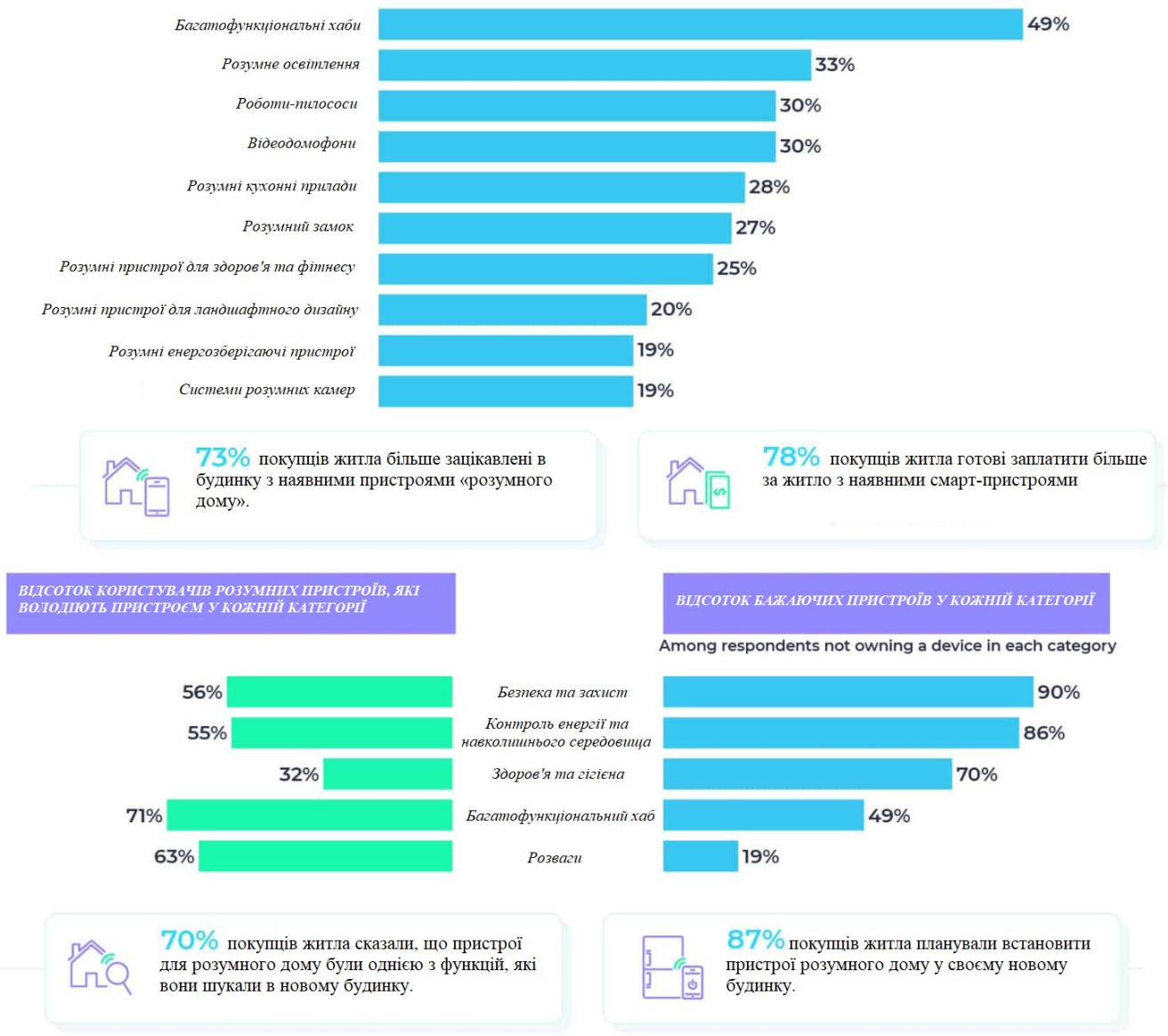



Рис.1.1 Найбажаніші пристрої для розумного дому

Технології розумного дому змінюють ринок нерухомості, оскільки все більше людей виявляють інтерес до встановлення цих функцій у своїх домівках. Пристрої розумного дому користуються особливо високим попитом серед покупців

житла покоління Y : 77% пристроїв, про які ми запитували, були більш схильні бути бажаними для мілленіалів, ніж для старших поколінь. Мілленіали найчастіше бажали розумних аксесуарів для дітей, розумних аксесуарів для собак та багатофункціональних центрів [2].

Дослідження впливу пристроїв для розумного дому на ринок нерухомості показало, що багато людей готові платити більше за житло, оснащене розумними технологіями. У дослідженні також повідомлялося, що як орендарі , так і покупці були зацікавлені в будинках з розумними пристроями, особливо через переваги економії енергії та покращеної безпеки дому . Дослідження дослідження дійшло висновку, що серед людей, які не мали розумної сигналізації, жінки майже вдвічі частіше, ніж чоловіки, бажали її мати.

Люди прагнуть використовувати технології розумного дому для покращення якості свого життя: ці пристрої надають різноманітні переваги, залежно від їхнього дизайну та функцій. І щороку на ринку з'являються нові пристрої, які пропонують рішення раніше недооціненої проблеми споживачів. Сьогодні більшість пристроїв розумного дому інтегруються з платформою If This Then That (IFTTT), яка дозволяє автоматизувати пристрої розумного дому . Це робить їх ще потужнішими, оскільки вони можуть реагувати на ваші дії. Наприклад, ви можете налаштувати свої зовнішні розумні світильники так, щоб вони вмикалися щоразу, коли ваша камера безпеки на задньому дворі ідентифікує людину.

Коли в дослідженні враховувався вік, ми виявили, що мілленіали частіше, ніж інші покоління, бажають зручності та економії часу від своїх смарт-пристроїв. Вони також рідше бажають безпеки та економії грошей. Безпека була тим, що жінки найбільше цінували, ніж чоловіки: 60% жінок вважали безпеку бажаною перевагою порівняно з 38% чоловіків, рис.1.2.

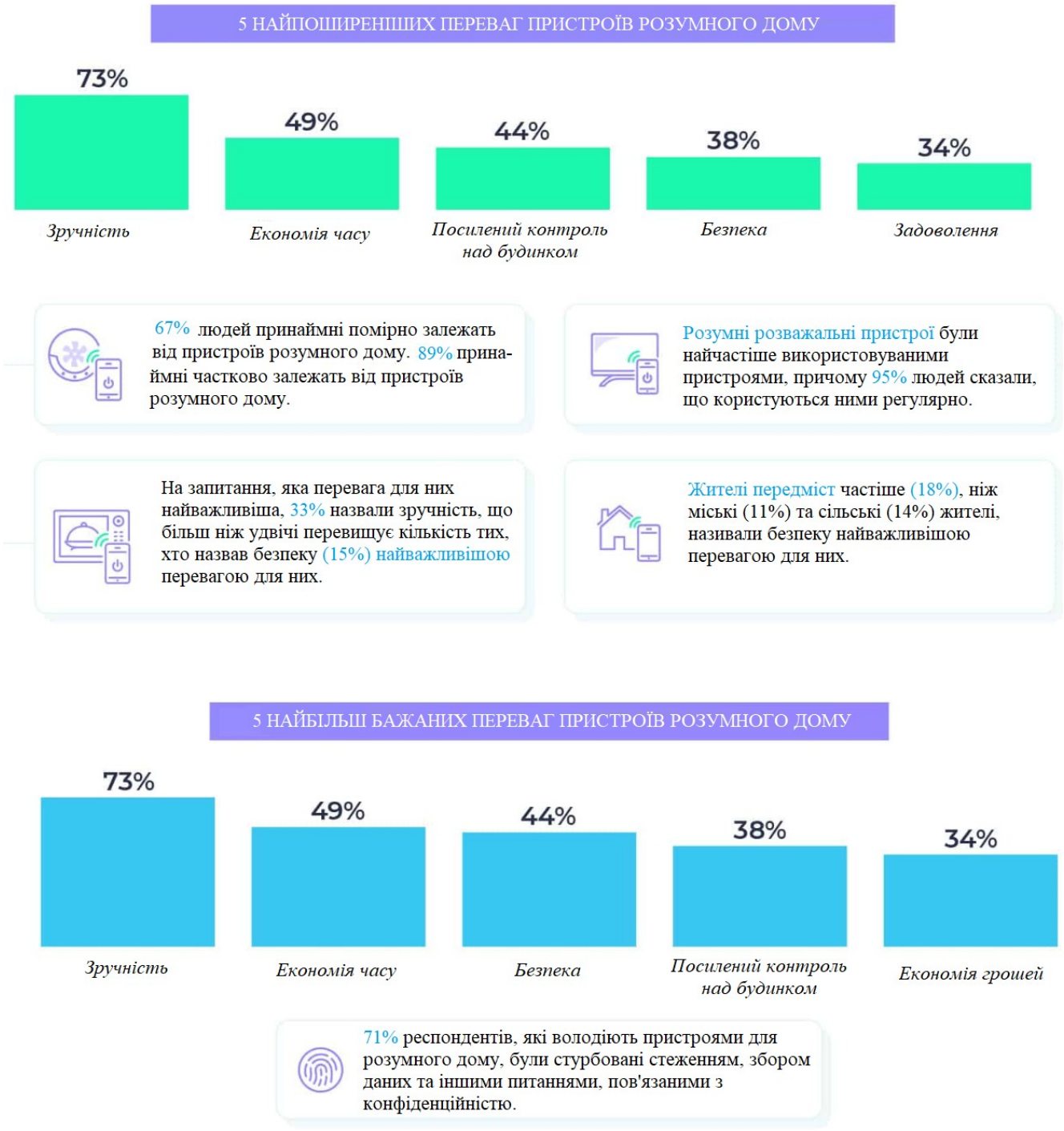



Рис.1.2. Статистика найпоширеніших переваг використання пристроїв «Розумний будинок»

Турбота про довкілля — ще одна причина, чому люди хочуть мати розумніші будинки. Екологічно чисті технології мають багато переваг, таких як зменшення впливу людей на довкілля, підвищення зручності та безпеки, а також економія на

витратах на енергію. Дослідження показало, що понад 4 з 10 осіб придбали розумний пристрій, щоб підвищити енергоефективність свого будинку [3].

Коли під час пандемії COVID-19 було запроваджено заходи соціального дистанціювання, люди почали проводити вдома більше часу, ніж будь-коли раніше. Далі розглядається, як ця нещодавня подія вплинула на ставлення людей до пристроїв розумного дому, рис.1.3.

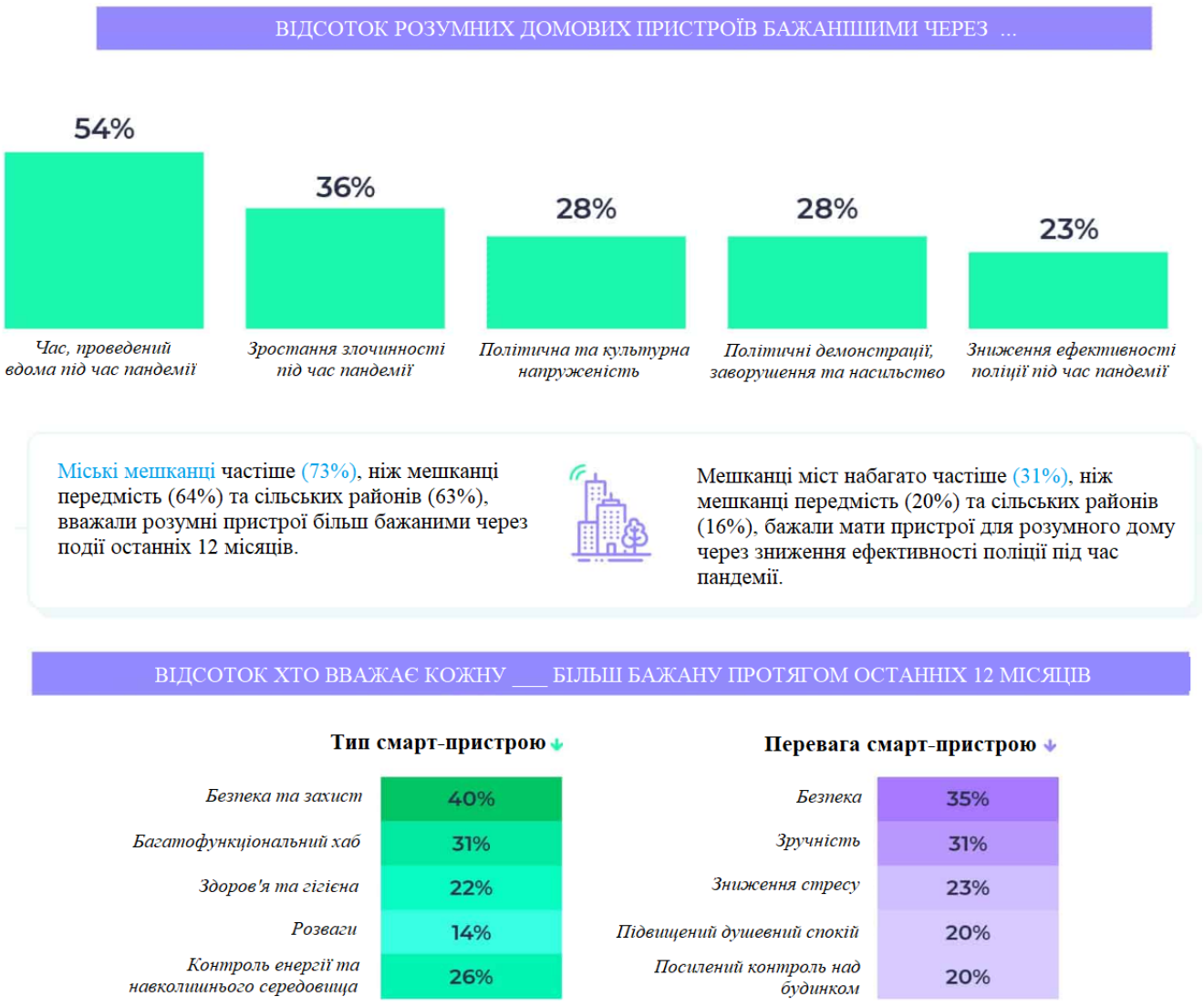



Рис.1.3 Статистика зручності пристроїв

Загалом, через події останніх років, мілленіали частіше, ніж старше покоління, бажали мати розумні пристрої. Зниження ефективності поліції, політичні демонстрації та насильство були двома головними причинами, чому

мілленіали тепер вважають розумні домашні пристрої більш бажаними. Також мілленіали частіше, ніж старше покоління, вважають багатофункціональні пристрої, пристрої для здоров'я та гігієни, а також енергозберігаючі пристрої більш бажаними через поточні події. Вони рідше вважали пристрої безпеки більш важливими.

Інше дослідження, яке вивчало вплив COVID-19, виявило, що кожен четвертий мешканець зараз більше цікавиться розумними технологіями, ніж до початку пандемії. Основною причиною цього зростання був той факт, що багато людей проводили більше часу вдома, ніж зазвичай. Експерти погоджуються, що сучасні світові події вплинули на домашнє життя людей, спонукаючи їх покращувати свою безпеку, захист та комфорт за допомогою технологій розумного дому.

### 1.2 Аналіз розміру, частки та тенденцій світового ринку розумного дому

Сегментація світового ринку розумного дому за типом продукту (системи керування розвагами, системи безпеки та контролю доступу, системи опалення, вентиляції та кондиціонування повітря, побутова техніка, розумна кухня, керування освітленням, розумні меблі, домашня охорона здоров'я та інші), технології (бездротові та дротові), програмне забезпечення та послуги (поведінкові та проактивні), канали збуту (прямі та непрямі), застосування (нове будівництво, модернізація та інші), пропозиції (поведінкові, проактивні та інші) - тенденції галузі та прогноз до 2032 року, рис.1.4. [4].




Рис.1.4 Глобальний ринок розумного будинку

Глобальний ринок розумного дому оцінювався у 183,69 мільярда доларів США у 2024 році та, як очікується , досягне 949,92 мільярда доларів США до 2032 року зі середньорічним темпом зростання 22,80% протягом прогнозованого періоду, рис.1.5.

Це зростання зумовлене такими факторами, як старіння населення, зростаюче впровадження пристроїв Інтернету речей (IoT), досягнення в домашній автоматизації на базі штучного інтелекту та підвищення обізнаності про енергоефективність [5].

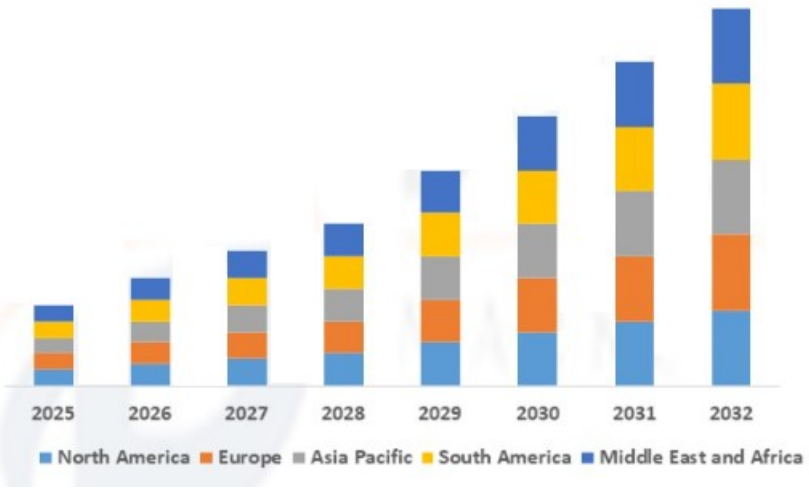



Рис.1.5. Статистика ринку «розумний дім» світового ринку

Аналіз ринку розумного дому.

Розумні домашні пристрої, включаючи такі технології, як голосові помічники, розумні термостати, системи керування освітленням, системи домашньої автоматизації та розумні прилади, революціонізують життя в житлових приміщеннях, підвищуючи зручність, безпеку, енергоефективність та загальний комфорт. Ці пристрої використовують штучний інтелект (ШІ), Інтернет речей (IoT) та автоматизацію для створення інтелектуального домашнього середовища.

Попит на рішення для розумного дому значною мірою зумовлений технологічним прогресом, підвищенням обізнаності споживачів, зростаючою увагою до енергозберігаючих рішень та бажанням підвищити зручність та покращити спосіб життя. Крім того, інтеграція розумних приладів, таких як холодильники, духовки та кавоварки, сприяє зростанню ринку.

Очікується, що Північна Америка домінуватиме на світовому ринку розумного дому, займаючи найбільшу регіональну частку в 36,15% у 2025 році. Це зумовлено високими темпами впровадження, добре розвиненою інфраструктурою та високою купівельною спроможністю споживачів.

Прогнозується, що у 2025 році на Азіатсько-Тихоокеанський регіон припадатиме 29,48% світового ринку розумного дому, що зробить його другим за величиною регіоном після Північної Америки. Швидка урбанізація, зростання доходів населення та зростання обізнаності про рішення для розумного дому в таких країнах, як Китай, Японія, Південна Корея та Індія, є ключовими рушійними силами зростання [6].

Очікується, що сегмент розумних кухонь домінуватиме на ринку з часткою ринку 38,15% у 2025 році. Зростаючий споживчий попит на підключені кухонні прилади, такі як розумні холодильники, духовки, посудомийні машини та кавоварки, у поєднанні з інноваціями в енергоефективності та зручності приготування їжі, стимулює зростання в цьому сегменті.

Ринок сегментується за типом продукту, технологією, програмним забезпеченням та послугами, застосуванням каналу збуту та пропозицією, представлено в табл.1.1.

Таблиця .1.1

Сегментація ринку за типом продукту, технологією, програмним забезпеченням та послугами, застосуванням каналу збуту та пропозицією

| Сегментація | Підсегментація |
|---|---|
| За типом продукту | Елементи керування розвагами, розумні дисплеї/телевізори, пристрої для потокового передавання, саундбари та динаміки, безпека та контроль доступу, камери безпеки, відеодомофони, розумні замки, програмне забезпечення та послуги віддаленого моніторингу, контроль опалення, вентиляції та кондиціонування повітря, розумні термостати, датчики, розумні вентиляційні отвори, побутова техніка,розумні пральні машини, розумні водонагрівачі, розумні пилососи, розумна кухня, керування освітленням, розумне освітлення, реле та перемикачі, датчики присутності, димери, розумні меблі, домашня медична допомога |
| За технологією | Бездротовий<br>Дротове |
| Програмне забезпечення та послуги | Поведінкові<br>Проактивний |
| За каналом продажів | Прямий<br>Непрямий |
| За застосуванням | Нове будівництво<br>Модернізація |

## 1.3 Регіональний аналіз ринку систем «розумний дім» та визначення провідних учасників галузі

«Північна Америка займає найбільшу частку на ринку розумного дому»

Північна Америка домінує на світовому ринку розумних будинків з часткою ринку 36,15%, що зумовлено широким впровадженням розумних технологій, надійною інтернет-інфраструктурою та високою купівельною спроможністю споживачів. Регіон лідирує в інтеграції штучного інтелекту, Інтернету речей та хмарних рішень у житлове середовище [7].

США займають значну частину регіонального ринку завдяки високому проникненню голосових асистентів, систем домашньої автоматизації та передових

рішень безпеки. Зростаюча перевага споживачів щодо зручності, енергоефективності та підвищеної безпеки дому продовжує стимулювати попит.

Регіон отримує вигоду від значних інвестицій у інновації розумного дому з боку великих технологічних компаній, таких як Amazon, Google та Apple, а також від активного розвитку екосистеми та сумісності між пристроями та платформами.

Крім того, зростаюча стурбованість щодо безпеки дому, споживання енергії та необхідності дистанційного моніторингу сприяє зростанню популярності розумних термостатів, систем спостереження, розумного освітлення та кухонної техніки, що ще більше зміцнює лідируючі позиції Північної Америки на світовому ринку розумного дому.

«Прогнозується, що в Азіатсько-Тихоокеанському регіоні буде зафіксовано найвищий сукупний річний темп зростання (CAGR) на ринку розумного дому»

Прогнозується, що Азіатсько-Тихоокеанський регіон займатиме 29,48% світового ринку розумного дому у 2025 році, що зробить його другим за величиною регіоном після Північної Америки. Це зростання зумовлене швидкою урбанізацією, збільшенням доходів населення, розширенням населення середнього класу та зростанням обізнаності про енергоефективність та домашню автоматизацію в таких країнах, як Китай, Японія, Південна Корея та Індія.

Такі країни, як Китай, Індія та Японія, стають ключовими ринками завдяки великій чисельності населення, урядовим ініціативам, що підтримують розумну інфраструктуру, та зростаючому інтересу споживачів до підключених пристроїв для покращення управління будинком та безпеки [8].

Очікується, що Китай займатиме найбільшу частку ринку в Азіатсько-Тихоокеанському регіоні, яка оцінюється в 42,6% у 2025 році, завдяки сильній державній підтримці розумних міст, зростанню проникнення Інтернету та зростаючому попиту на побутову техніку на базі штучного інтелекту та Інтернету речей.

Індія йде далі з часткою ринку 26,5% у 2025 році, де зростання використання смартфонів, молоде технічно підковане населення та сплеск житлового будівництва прискорюють впровадження розумних будинків.

Прогнозується, що Японія з її розвиненою технологічною екосистемою та акцентом споживачів на зручності та енергозбереженні становитиме 18,2% від частки ринку регіону у 2025 році.

Частка ринку розумного дому

Конкурентний ландшафт ринку надає детальну інформацію за конкурентами. Включені такі деталі: огляд компанії, фінансові показники компанії, отриманий дохід, ринковий потенціал, інвестиції в дослідження та розробки, нові ринкові ініціативи, глобальна присутність, виробничі майданчики та обладнання, виробничі потужності, сильні та слабкі сторони компанії, запуск продукту, широта та обсяг продукту, домінування в застосуванні. Наведені вище дані стосуються лише зосередження компаній на ринку.

Основними лідерами ринку, що працюють на ньому, є:

- Honeywell International Inc. (США)
- Siemens (Німеччина)
- Johnson Controls (Ірландія)
- Axis Communications AB (Швеція)
- Schneider Electric (Франція)
- ASSA ABLOY (Швеція)
- Amazon (США)
- Apple Inc. (США)
- ADT (США)
- ABB (Швейцарія)
- Robert Bosch GmbH (Німеччина)
- Корпорація Sony (Японія)
- Samsung (Південна Корея)
- Ooma Inc. (США)
- Delta Controls (Канада)
- Comcast (США)
- Crestron Electronics Inc. (США)

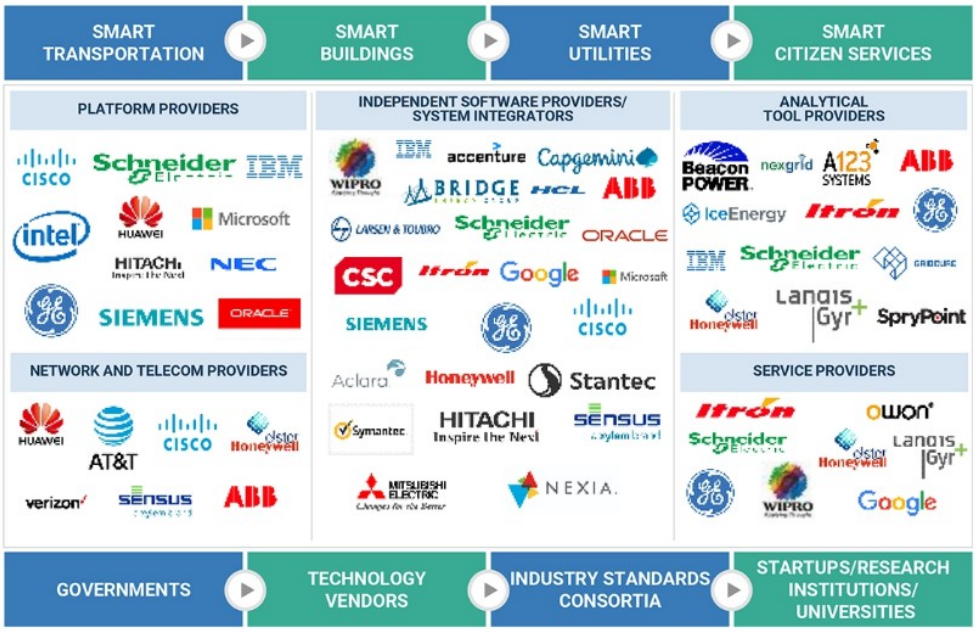



Рис.1.6 Лідери ринку

## 1.4 Огляд переваг автоматизації розумного дому

Простота та зручність:

Наріжним каменем автоматизації розумного дому є зручність. За допомогою кількох дотиків на смартфоні або голосових команд домовласники можуть керувати різними аспектами свого будинку. Уявіть, що ви регулюєте термостат, вимикаєте світло або перевіряєте камери безпеки з будь-якої точки світу. Минули ті часи, коли ви хвилювалися, чи залишили ви духовку увімкненою, чи гаражні ворота відчиненими — тепер швидкий погляд на телефон може заспокоїти вас.

Енергоефективність та економія коштів:

Розумні будинки — це не лише комфорт, вони також про екологічність. Розумні термостати вивчають ваш розклад і вподобання, регулюючи температуру для оптимізації використання енергії. Розумне освітлення може регулювати яскравість або вимикатися, коли воно не потрібне, а монітори енергії надають зворотний зв'язок щодо споживання електроенергії в режимі реального часу, допомагаючи зменшити відходи та зменшити рахунки [9].

Посилена безпека:

Автоматизація розумного дому піднімає безпеку на нові висоти. За допомогою розумних замків ви можете дистанційно надавати або забороняти доступ до свого будинку. Камери спостереження можна контролювати зі смартфона, а розумні сигналізації можуть негайно повідомляти вас про будь-яку незвичайну активність. Ці функції забезпечують душевний спокій, незалежно від того, чи ви в ліжку, чи на іншому кінці світу.

Доступність для всіх:

Доступність – ще одна суттєва перевага автоматизації розумного дому. Люди похилого віку або люди з інвалідністю можуть керувати своїм оточенням за допомогою голосових команд або спрощених інтерфейсів, що забезпечує їм більшу незалежність та якість життя.

Здоров'я та благополуччя:

Розумні будинки також можуть сприяти вашому здоров’ю та самопочуттю. Монітори якості повітря можуть попереджати вас про підвищений рівень чадного газу або інших шкідливих газів. Розумні очищувачі води забезпечують вам доступ до чистої питної води, а підключені медичні пристрої можуть контролювати життєво важливі показники та нагадувати вам вчасно приймати ліки.

Обслуговування будинку:

Технічне обслуговування стає менш клопітким завдяки технологіям розумного дому. Детектори протікання можуть попередити вас про проблеми з водою, перш ніж вони переростуть у катастрофу, а розумні прилади можуть повідомляти вас, коли їм потрібне обслуговування або коли запаси низькі.

Розваги:

Домашні розваги трансформувалися завдяки автоматизації розумного дому. Завдяки аудіосистемам для кількох кімнат, потоковим сервісам та смарт-телевізорам ви можете насолоджуватися улюбленою музикою, шоу чи фільмами в будь-якій кімнаті будинку, все синхронізовано та легко керовано.

Персоналізований комфорт та турбота:

Розумні гаджети змінили те, як ми відчуваємо комфорт та турботу в наших домівках. Такі пристрої, як розумні ліжка, монітори якості повітря та

персоналізовані налаштування освітлення, задовольняють ваші унікальні потреби, забезпечуючи здорове та індивідуальне середовище проживання. Чи то оптимізація режиму сну, чи покращення якості повітря в приміщенні, ці розумні пристрої навчаються та адаптуються до ваших уподобань, значною мірою сприяючи вашому загальному самопочуттю [10].

Безперешкодна взаємозв'язок та екосистема:

Перевага автоматизації розумного дому полягає у взаємопов’язаній природі пристроїв, які безперебійно працюють разом. Завдяки єдиній екосистемі ваш розумний термостат, освітлення, системи безпеки та багато іншого можуть взаємодіяти один з одним для оптимізації функціональності вашого дому. Цей взаємозв’язок дозволяє створювати складні процедури автоматизації, такі як налаштування ідеальної вечірньої атмосфери однією командою або синхронізація всіх пристроїв для енергоефективності, що покращує враження від розумного дому.

Готовність до стихійних лих та душевний спокій:

Розумні гаджети відіграють вирішальну роль у підготовці до стихійних лих, забезпечуючи душевний спокій у часи невизначеності. Такі пристрої, як розумні детектори диму, датчики витоку води та монітори навколишнього середовища, розроблені для миттєвого сповіщення про потенційні небезпеки, що дозволяє швидко реагувати та мінімізувати збитки. Завдяки сповіщенням у режимі реального часу та дистанційному моніторингу ви можете бути впевнені, що ваш будинок захищений від непередбачених подій, навіть коли вас немає поруч.

Підвищена енергоефективність

1. Розумні термостати: Розумні термостати – це революційний спосіб енергоефективності. Вони вивчають ваші звички та регулюють опалення й охолодження на основі прогнозів заповненості та погоди, гарантуючи, що енергія використовується лише тоді, коли це необхідно. Це не лише зменшує споживання енергії, але й знижує рахунки за комунальні послуги, роблячи ваш дім більш екологічним.

2. Розумне освітлення: Системи розумного освітлення дозволяють вам планувати вмикання або вимикання світла в певний час або регулювати його

залежно від наявності природного світла. Ці системи зменшують непотрібне споживання енергії та сприяють більш енергоефективному дому, одночасно покращуючи атмосферу вашого житлового простору.

3. Моніторинг споживання енергії: Завдяки моніторингу споживання енергії системи розумного будинку надають детальну інформацію про те, скільки енергії споживає ваш будинок і де ви можете внести покращення. Відстежуючи споживання енергії, ви можете виявити пристрої з високим споживанням енергії та відповідно скоригувати свої звички, що призведе до більш сталого та економічно ефективного життя.

## 1.5 Глобальна статистика технологій розумного дому та їх перспектива росту

Станом на 2024 рік у світі налічувалося близько 411 мільйонів розумних будинків . За оцінками, до цього року їх кількість становитиме близько 470 мільйонів .

У 2023 році було оцінено, що світові витрати на Інтернет речей (IoT), тобто мережу пристроїв, підключених до Інтернету, досягли 805,7 мільярда доларів США . Очікувана ринкова вартість технологій розумного дому у 2023 році становила 102,3 мільярда доларів США . З річним темпом зростання 10,3% прогнозується, що до 2028 року вона досягне 166,7 мільярда доларів США.

Глобальний ринок технологій розумного дому оцінювався в 84,5 мільярда доларів США і, як очікується, зросте до 116,4 мільярда доларів США до 2029 року, рис.1.7.

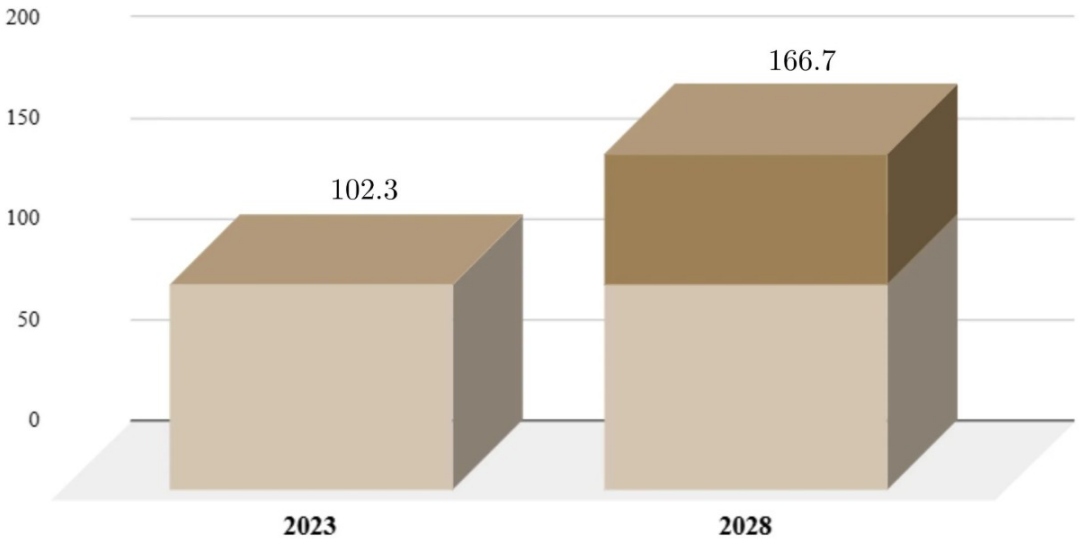



Рис.1.7. Глобальна ринкова вартість технологій розумного дому

У 2022 році світовий дохід ринку технологій розумного дому склав 30,9 мільярда доларів США для різних типів пристроїв, таких як розумна побутова техніка, системи управління енергоспоживанням та домашні розваги, рис.1.8.

Прогнозується, що до 2026 року дохід стрімко зросте до 47,1 мільярда доларів США [11].

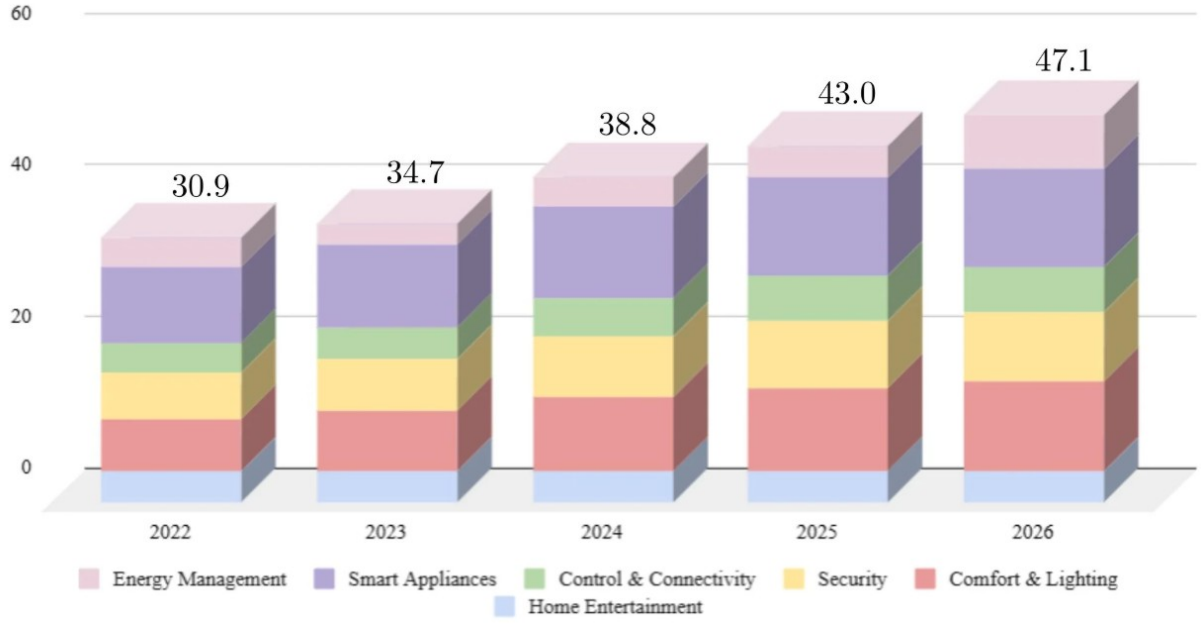



Рис.1.8. Глобальний дохід від розумних пристроїв 2022-2026 (у млрд доларів США)

Понад 5,5 мільярда гаджетів для розумного дому, сумісних з ріхними технологіями, буде поставлено між 2022 і 2030 роками . Бездротові технології забезпечують безперешкодну навігацію між різними голосовими помічниками та програмами.

Зростання технологій розумного дому відображає зростаючий попит на зручність та автоматизацію, зумовлений досягненнями в галузі Інтернету речей та пристроїв.

Однак проблеми конфіденційності даних залишаються головною перешкодою, що впливає на довіру споживачів та їхнє впровадження. Щоб підтримувати зростання, компанії повинні зосередитися на прозорості та посиленні заходів безпеки.

У 2024 році 69,91 мільйона домогосподарств США активно використовували пристрої розумного дому . Прогнозується, що до 2028 року це число зросте до 103 мільйонів, рис.1.9.

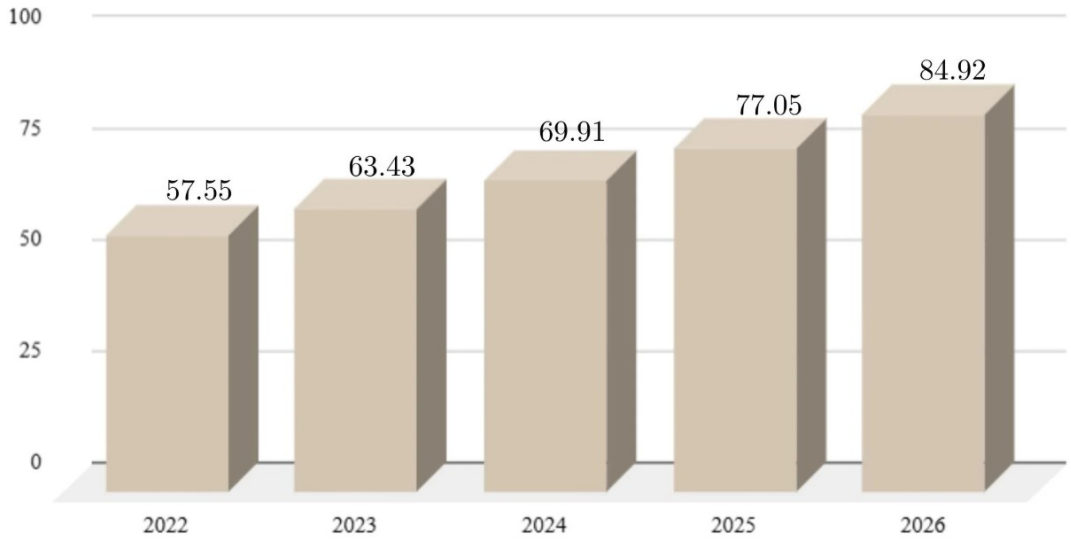



Рис.1.9. Домогосподарства, які використовують пристрої розумного дому, 2022-2026 (у мільйонах)

Очікується, що 57% споживачів у США перейдуть на технології розумного дому до 2025 року .

Прогнозується , що дохід від ринку розумного дому досягне 43 мільярдів доларів США до 2025 року та 59 мільярдів доларів США до 2029 року , з річним темпом зростання 8,25% .

67% користувачів, які користуються технологіями розумного дому, вважають ці пристрої занадто дорогими , тоді як понад 50% стурбовані безпекою даних і стикаються з частими проблемами з підключенням [12].

У 2024 році  найпопулярнішим брендом пристроїв для розумного дому був Samsung, причому 22% респондентів заявили, що володіють принаймні одним пристроєм цієї компанії.

72% респондентів європейців використовували розумні розважальні пристрої, такі як телевізори, колонки та гарнітури віртуальної реальності, рис.1.10.

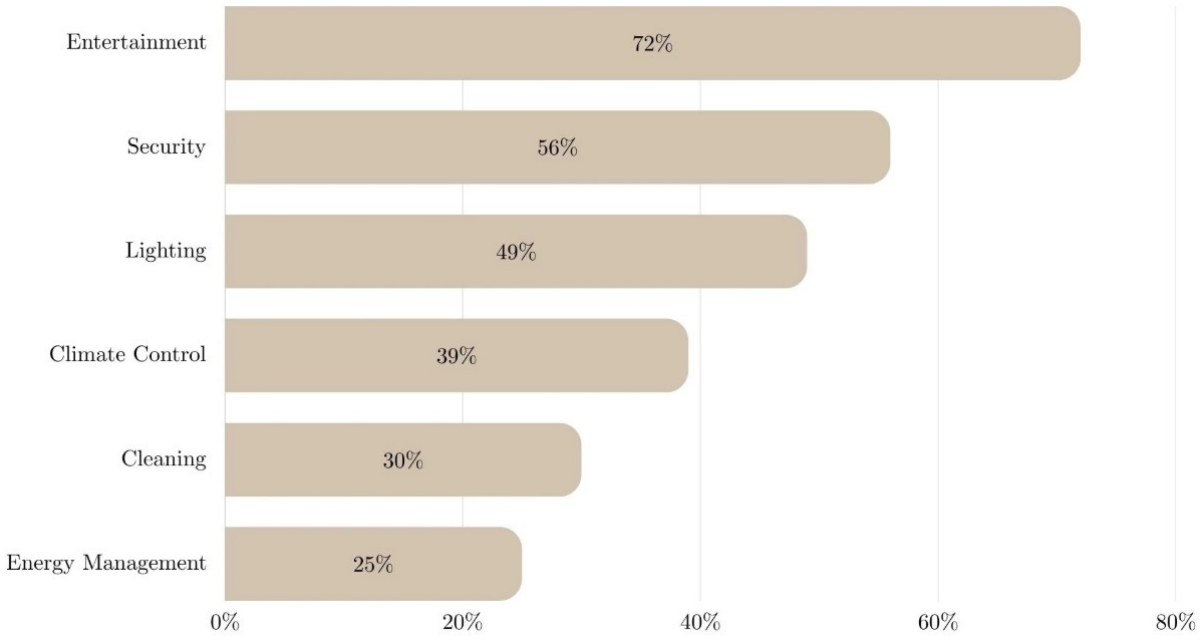



Рис.1.10. Найчастіше використовувані пристрої розумного дому (у відсотках)

Середньостатистичний коричтувач  витратив у 2022 році в середньому до 1000 доларів на пристрої для розумного дому .

45% європейських домогосподарств мають принаймні один пристрій «розумного дому», тоді як 18% мають шість або більше.

Технології розумного дому стають дедалі поширенішими в американських домогосподарствах, де зростання популярності зумовлене пристроями, орієнтованими на зручність та розваги. Хоча такі бренди, як Samsung, лідирують на ринку, кілька проблем залишаються ключовими для багатьох користувачів.

Незважаючи на ці перешкоди, ринок демонструє стабільне зростання, що підтримується зростанням інтересу споживачів та інтеграцією розумних технологій у повсякденне життя.

**Голосові помічники.**

У 2022 році приблизно 142 мільйони людей користувалися голосовими помічниками. Прогнозується, що до 2026 року це число зросте до 157,1 мільйона .

Звіт Voicebot за 2022 рік показав, що 57% користувачів щодня використовують принаймні одну голосову команду .

Прогнозується, що до 2032 року світовий ринок розпізнавання мовлення та голосу становитиме 83 мільярди доларів США , а сукупний річний темп зростання (CAGR) – 20%.

Google Assistant є лідером, маючи понад 85 мільйонів користувачів у США у 2023 році . Прогнозується, що його база користувачів зросте ще більше, наближаючись до 92 мільйонів до 2025 року. Це ставить його попереду Siri, яка має 86,5 мільйона користувачів , та Alexa з 77,2 мільйонами, рис.1.11.

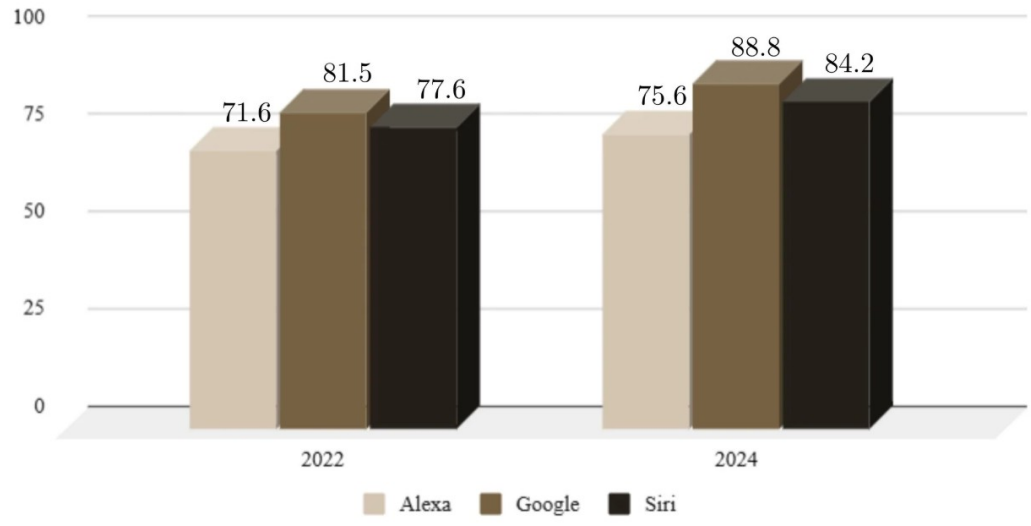



Рис.1.11. Користувачі голосових асистентів за брендами, 2022-2024 (мільйон)

Глобальна вартість транзакцій в електронній комерції через голосових помічників оцінюється в 19,4 мільярда доларів , що відображає зростання на 400% за два роки .

Голосові помічники стають невід'ємною частиною повсякденного життя, майже половина населення Америки регулярно користується ними, а світові ринки швидко розширюються.

Google Assistant лідирує за популярністю, випереджаючи Siri та Alexa, тоді як електронна комерція з голосовим керуванням переживає безпрецедентне зростання. Зі зростанням популярності технології розпізнавання голосу продовжують змінювати те, як користувачі взаємодіють із пристроями та здійснюють транзакції [13].

**Домашні розваги.**

Прогнозується, що світовий дохід від ринку розумних колонок стабільно зростатиме з 2024 по 2029 рік, із загальним збільшенням у 9,5 мільярда доларів , що становить зростання на 47,08%.

Очікується, що до 2033 року обсяг ринку розумних колонок становитиме близько 105,5 мільярда доларів США .

Глобальний ринок смарт-телевізорів у 2023 році оцінювався в 144,1 мільярда доларів , і очікується, що він зростатиме зі середньорічним темпом зростання (CAGR) на 8,9%, досягнувши 261,9 мільярда доларів до 2030 року.

У 2024 році операційна система Tizen від Samsung лідирувала на світовому ринку операційних систем для смарт-телевізорів з часткою 12,8% , що використовується на 120 мільйонах смарт-телевізорів. За нею йшла ОС VIDAA від Hisense з часткою 7,8%, а Web OS від LG з 7,4%, рис.1.12.

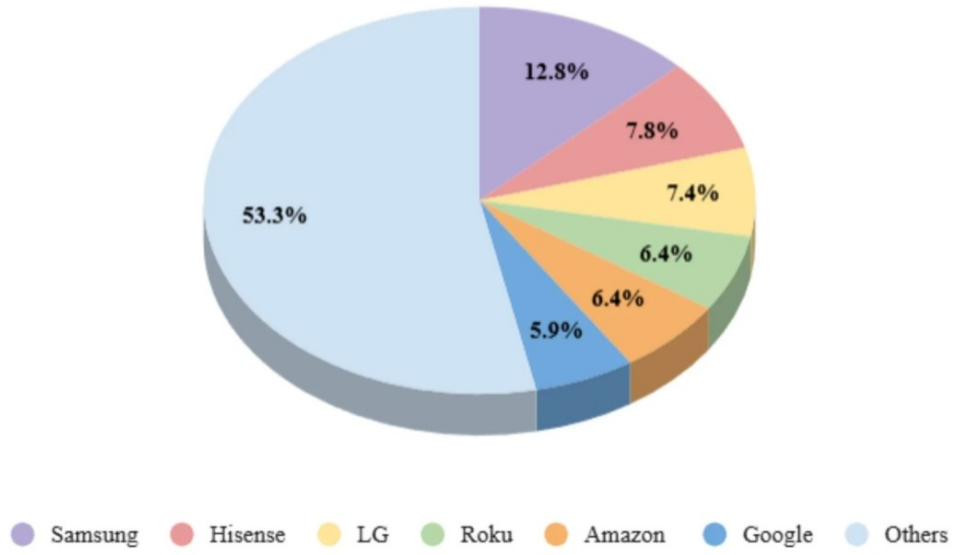



Рис.1.12. Частка світового ринку смарт-телевізорів, 2024

У 2024 році Amazon Alexa займає перше місце на ринку віртуальних персональних помічників з часткою 37,1% , що зумовлено високою залученістю користувачів.

Статистика домашньої автоматизації показує, що 44% розумних будинків оснащені системами розумних розваг, такими як Google Chromecast, Apple TV або Amazon Fire TV.

Ринок розумних колонок продовжує значно розширюватися, де Alexa лідирує завдяки своїй широкій інтеграції та зручним функціям. Розумні розважальні системи, включаючи потокові пристрої та смарт-телевізори, також стають фундаментальними елементами підключених будинків [14].

Безпека

Ринок розумних дверних дзвінків зріс з 5,06 млрд доларів США у 2023 році до 5,92 млрд доларів США у 2024 році та, за прогнозами, продовжить зростати зі середньорічним темпом зростання (CAGR) 18,18%, досягнувши 16,29 млрд доларів США до 2030 року.

Використання розумних домашніх камер помітно зросло на 55% з 2021 по 2022 рік , що підкреслює зростаючий акцент на домашньому спостереженні.

Прогнозується , що кількість домогосподарств у світі з інтелектуальними камерами безпеки зросте з 77,4 мільйона у 2022 році до 163,7 мільйона до 2026 року,

що на 86,3 мільйона домогосподарств більше, ніж зазвичай, і становить темпи зростання 111,5%, рис.1.13.

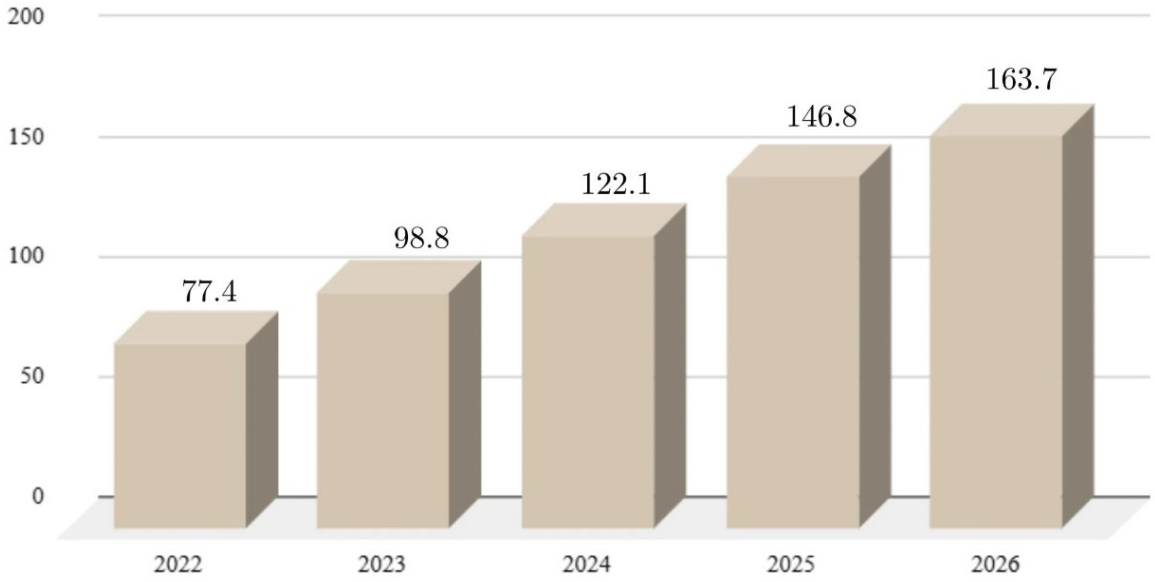



Рис.1.13 Домогосподарства з інтелектуальними камерами безпеки у всьому світі, 2022-2026 (мільйони)

Споживачі витрачають від 700 до 5000 доларів на пристрої для забезпечення розумної домашньої безпеки, в середньому 2850 доларів. Налаштування варіюються від сигналізації та дверних дзвінків до повноцінних домашніх систем з автоматизованими датчиками та замками.

Кожен третій користувач хвилюється про хакерські атаки на смарт-пристрої в своїх домівках . Найбільше занепокоєння серед пристроїв для споживачів викликають Amazon Echo, камери безпеки, термостати Google Nest, розумні дверні дзвінки та смарт-телевізори.

Швидке зростання популярності інтелектуальних пристроїв безпеки підкреслює зростаючий пріоритет, який надається безпеці та відеоспостереженню вдома. Споживачі значно інвестують у різноманітні системи, від простих сигналізацій до повністю інтегрованих систем, що відображає прагнення як до зручності, так і до захисту.

Однак, побоювання щодо хакерських атак та безпеки даних залишаються, що підкреслює необхідність для виробників надавати пріоритет заходам кібербезпеки. Зі прискоренням впровадження, галузь має можливість зміцнити довіру, усунувши ці вразливості, продовжуючи впроваджувати інновації в рішеннях для безпеки розумного дому [15].

**Управління енергією**

У 2021 році було встановлено 19,6 мільйона розумних термостатів , що зменшило споживання енергії на опалення та охолодження на 1,4% . Прогнозується, що до 2026 року ця кількість досягне 38,3 мільйона , що потенційно може заощадити 15,5 ТВт/год електроенергії .

Прогнозується, що світовий ринок розумних термостатів, оцінений у 4,99 мільярда доларів США у 2024 році , зростатиме зі щорічним темпом зростання 18,5% з 2025 по 2030 рік.

Станом на 2024 рік, розумні термостати коштують від 150 до 320 доларів і пропонують такі функції, як дистанційне керування через додатки для смартфонів, автоматичне навчання домашньому режиму та налаштування енергозбереження, рис.1.14.

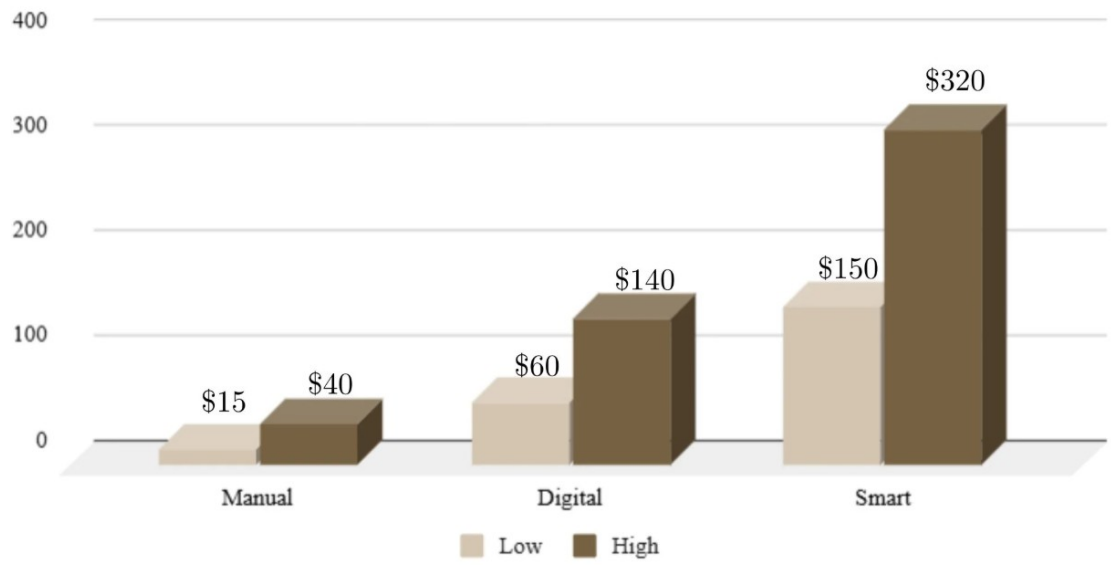



Рис.1.14. Середні ціни на термостати, 2023 ($)

Розумні термостати EnergyStar заощаджують в середньому 8% на рахунках за опалення та охолодження , приблизно 50 доларів США на рік . Суми можуть змінюватися залежно від клімату, особистих уподобань щодо комфорту, кількості людей та обладнання HVAC.

Розумні термостати використовують машинне навчання для налаштування параметрів на основі побутових звичок, зменшуючи споживання енергії на 10-15% . На відміну від традиційних моделей, вони адаптуються до фактичного використання, знижуючи витрати та скорочуючи викиди вуглецю.

Розумні термостати набирають популярності, оскільки все більше домогосподарств використовують їх для енергоефективності та економії коштів. Ці пристрої, які використовують машинне навчання для налаштування параметрів на основі звичного ритму, допомагають зменшити споживання енергії та зменшити рахунки за опалення та охолодження.

Завдяки постійним удосконаленням та більш доступним варіантам, ці пристрої пропонують привабливе рішення для екологічно свідомих споживачів, які прагнуть як зручності, так і економії [8].

**Розумні меблі та побутова техніка.**

Прогнозується , що світовий ринок розумної побутової техніки генеруватиме 68,7 мільярда доларів доходу до 2025 року , зростаючи зі середньорічним темпом зростання 9,81% і досягнувши 99,9 мільярда доларів до 2029 року . До того часу очікується , що кількість активних домогосподарств досягне 643,9 мільйона .

Прогнозується , що світовий ринок розумних меблів зросте з 2,2 млрд доларів США у 2022 році до 3,3 млрд доларів США до 2026 року зі середньорічним темпом зростання (CAGR) 10%. Розумні меблі підключаються до Інтернету, що дозволяє керувати ними за допомогою голосових команд або додатків, рис.1.15.

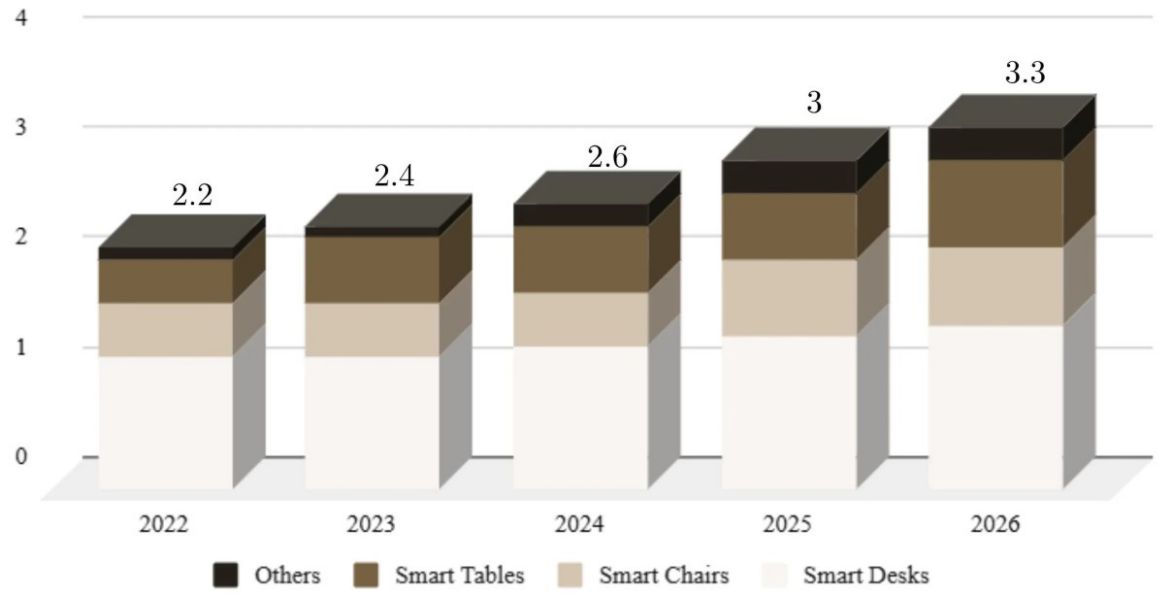



Рис.1.15. Розмір світового ринку розумних меблів, 2022-2026 (млрд. доларів США)

Глобальний ринок розумних ліжок оцінювався в 3,27 млрд доларів США у 2023 році та, як очікується, досягне 6,05 млрд доларів США до 2032 року зі середньорічним темпом зростання 7,3%. Північна Америка лідирувала на ринку, займаючи 31,8% частки .

Опитування Consumer Reports, проведене у жовтні 2022 року, показало, що 21% користувачів мали принаймні один великий розумний прилад , такий як пральна машина, сушарка, холодильник або посудомийна машина. До них також належать плити, вбудовані мікрохвильові печі та настінні духовки.

Те саме опитування показало, що 39% респондентів назвали зручність ключовою причиною використання або розгляду варіантів використання розумних приладів , тоді як 31% наголосили на енергоефективності.

Приблизно 34% користувачівстурбовані конфіденційністю даних , тоді як 33% хвилюються щодо злому систем під час використання розумних приладів.

Швидке зростання ринків розумних меблів та побутової техніки відображає зсув до більш інтегрованих, технологічно оснащених житлових просторів. Прагнення до енергоефективних приладів, поряд зі зручністю, стимулює їх широке впровадження.

**Розумне освітлення.**

Прогнозується , що світовий ринок розумного освітлення зросте з 15,5 мільярда доларів США у 2023 році до приблизно 35,3 мільярда доларів США до 2028 року , зі сукупним річним темпом зростання (CAGR) 17,9%, рис.1.16.

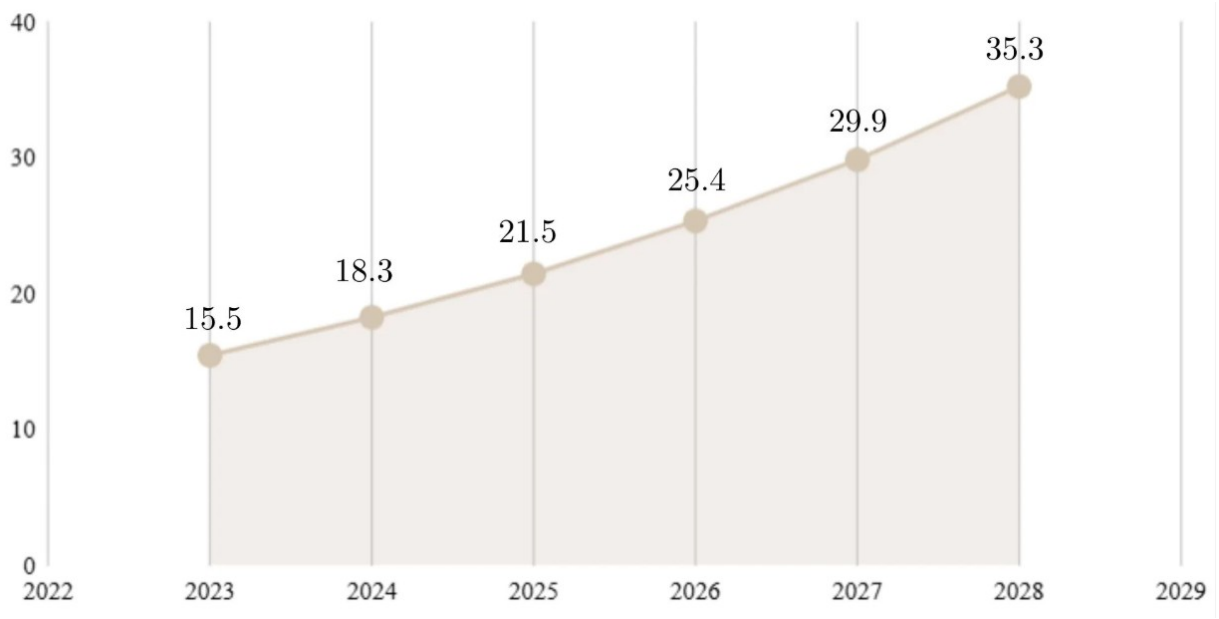



Рис.1.16. Глобальний ринок розумного освітлення, 2023-2028 (млрд. доларів США)

Очікується, що до 2029 року кількість активних домогосподарств, які використовують розумне освітлення, досягне 714,4 мільйона , при цьому рівень проникнення домогосподарств зросте з 14,9% у 2025 році до 34,1% до 2029 року .

Системи розумного освітлення забезпечують значну економію енергії, скорочуючи витрати на освітлення на 35–70 % . Використовуючи технології Інтернету речей, ці системи дозволяють здійснювати ефективний моніторинг та керування, підтримуючи управління енергією в режимі реального часу.

Розумні лампи коштують в середньому 42 долари за штуку , причому ціни варіюються від 2,24 долара за лампочку Cree 60 Вт до 90,35 долара за преміальну декоративну свічку Philips Hue.

Оскільки системи розумного освітлення стають більш доступними та доступними, вони пропонують значну економію коштів, а також дозволяють

розумніше використовувати енергію. Зі зростанням кількості домогосподарств, які планують інтегрувати ці системи, ми спостерігаємо перехід до розумніших та екологічніших будинків [9].

Доступність розумного освітлення в поєднанні з його потенціалом енергозбереження, ймовірно, прискорить цей перехід, зробивши його ключовою частиною екосистеми розумного дому.

# 2 ДОСЛІДЖЕНЯ ОСОБЛИВОСТЕЙ, ТЕХНІЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК МІКРОПРОЦЕСОРА CORTEX M4 ТА ЗАСОБІВ РЕАЛІЗАЦІЇ СИСТЕМИ

## 2.1 Дослідження сімейство процесорів ARM

Протягом багатьох років компанія ARM розробила досить багато різних процесорних продуктів. На наступній діаграмі, рис.2.1, процесори ARM поділено на класичні процесори ARM та новішу лінійку процесорів Cortex [16].

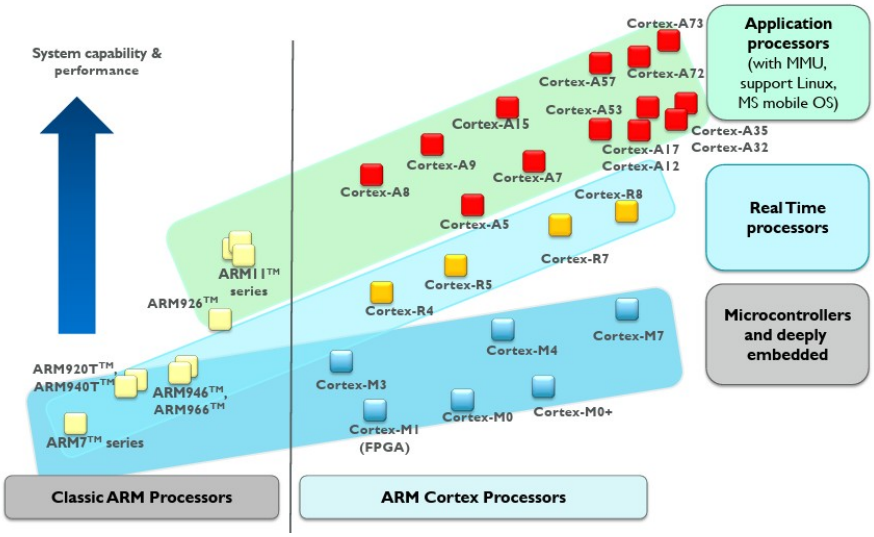



Рис.2.1 Сімейство процесорів ARM

Крім того, ці процесори поділено на три групи залежно від області застосування:

Процесори додатків – високопродуктивні процесори для мобільних обчислень, смартфонів, серверів тощо. Ці процесори працюють на вищій тактовій частоті (понад 1 ГГц) та підтримують блок керування пам'яттю (MMU), який необхідний для повнофункціональних ОС, таких як Linux, Android, MS Windows та мобільних ОС. Якщо ви плануєте розробляти продукт, який вимагає однієї з цих ОС, вам потрібно використовувати процесор додатків. Процесори реального часу – це дуже високопродуктивні процесори для додатків реального часу, таких як

контролер жорсткого диска, автомобільна силова установка та керування базовою смугою в бездротовому зв'язку. Більшість цих процесорів не мають MMU та зазвичай мають блок захисту пам'яті (MPU), кеш та інші функції пам'яті, призначені для промислового застосування. Вони можуть працювати на досить високій тактовій частоті (наприклад, від 200 МГц до >1 ГГц) та мають дуже низьку затримку відгуку. Хоча ці процесори не можуть запускати повні версії Linux або Windows, існує безліч операційних систем реального часу (RTOS), які можна використовувати з цими процесорами. Мікроконтролерні процесори – ці процесори зазвичай розроблені з набагато меншою площею кремнію та значно високою енергоефективністю. Зазвичай вони мають коротший конвеєр і зазвичай нижчу максимальну частоту (хоча деякі з цих процесорів можна знайти з частотою понад 200 МГц). Водночас, новіше сімейство процесорів Cortex-M розроблено для дуже простого використання; тому вони дуже популярні на ринку мікроконтролерів та глибоко вбудованих систем. У табл.2.1 наведено основні характеристики трьох лінійок процесорів [17].

Таблиця 2.1

Огляд характеристик процесора

| | Процесори додатків | Процесори реального часу | Мікроконтролерні процесори |
|---|---|---|---|
| Дизайн | Висока тактова частота, довгий конвеєр, висока продуктивність, підтримка мультимедіа (розширення набору інструкцій NEON) | Висока тактова частота, довгий або середній конвеєр, детермінований (низька затримка переривань) | Короткий конвеєр, наднизьке енергоспоживання, детермінований (низька затримка переривань) |
| Системні функції | Блок керування пам'яттю (MMU), кеш-пам'ять, розширення безпеки ARM TrustZone® | Блок захисту пам'яті (MPU), кеш-пам'ять, щільно зв'язана пам'ять (TCM) | Блок захисту пам'яті (MPU), вкладений контролер векторних переривань (NVIC), контролер переривань пробудження (WIC) |
| Цільові ринки | Мобільні обчислення, смартфони, енергоефективні сист. | Промислові мікроконтролери, автомобільна тех. | Мікроконтролери, глибоко вбудовані системи |

## 2.2 Аналіз сімейства процесорів Cortex-M

Сімейство процесорів Cortex-M більше орієнтоване на нижній кінець шкали продуктивності. Однак ці процесори все ще досить потужні порівняно з іншими типовими процесорами, що використовуються в більшості мікроконтролерів. Наприклад, процесори Cortex-M4 та Cortex-M7 використовуються в багатьох високопродуктивних мікроконтролерних продуктах, з максимальною тактовою частотою понад 200 МГц. Звичайно, продуктивність не є єдиним фактором при виборі процесора. У багатьох застосуваннях низьке енергоспоживання та вартість є ключовими критеріями вибору. Тому сімейство процесорів Cortex-M містить різні продукти для задоволення різних потреб, табл.2.2.

Таблиця 2.2

Сімейство процесорів Cortex-M

| | Описи |
|---|---|
| Cortex-M0 | Дуже маленький процесор (починаючи з 12K вентилів) для недорогих, наднизькоенергетичних мікроконтролерів та глибоко вбудованих застосувань |
| Cortex-M0+ | Найбільш енергоефективний процесор для невеликих вбудованих систем. Подібний за розміром та програмістською моделлю до процесора Cortex-M0. |
| Cortex-M1 | Невеликий процесор, оптимізований для проектування FPGA, що забезпечує реалізацію тісно зв'язаної пам'яті (TCM) з використанням блоків пам'яті на FPGA. Той самий набір команд, що й у Cortex-M0. |
| Cortex-M3 | Невеликий, але потужний вбудований процесор для малопотужних мікроконтролерів, який має багатий набір інструкцій для швидшої обробки складних завдань. Він має апаратний дільник та інструкції множення-нарахування (MAC). |
| Cortex-M4 | Він забезпечує всі функції Cortex-M3, з додатковими інструкціями, спрямованими на завдання цифрової обробки сигналів (DSP), такі як обробка кількох інструкцій (SIMD) та швидші одноциклові операції MAC. |
| Cortex-M7 | Високопродуктивний процесор для високопродуктивних мікроконтролерів та ресурсомістких програм. Він має всі функції ISA, доступні в Cortex-M4, з додатковою підтримкою обчислень з плаваючою комою подвійної точності, а також додатковими функціями пам'яті, такими як кеш та щільно зв'язана пам'ять (TCM). |

Зовсім відмінні від застарілих процесорів ARM (наприклад, ARM7TDMI, ARM9), процесори Cortex-M мають зовсім іншу архітектуру. Наприклад: - Підтримують лише інструкції ARM Thumb®, які були розширені для підтримки як 16-бітних, так і 32-бітних інструкцій у Thumb-2. - - - - Обробка переривань здійснюється вбудованим контролером переривань під назвою Nested Vector Interrupt Controller (NVIC), який забезпечує автоматичну пріоритезацію, маскування та вкладеність переривань та системних винятків. Обробники переривань можуть бути написані як звичайні функції C, а механізм векторної обробки переривань уникає необхідності використання програмного забезпечення для визначення того, яке переривання обслуговувати. Водночас, відповіді на переривання є детермінованими та мають низьку затримку. Таблиця векторів змінена з інструкцій розгалуження на початкові адреси обробників переривань та системних винятків. Банк регістрів та деякі деталі моделі програміста також були змінені. Зміни означають, що багато старого коду асемблера, написаного для класичних процесорів ARM, потребуватимуть модифікацій, а старі проекти потребуватимуть модифікації та перекомпіляції під час міграції у світ Cortex-M [18].

**Характеристики процесорів Cortex-M.**

Існує багато подібностей між процесорами Cortex-M0, M0+, M3, M4 та M7, рис.2.2,наприклад:

- базова модель програміста;

- вкладений векторний контролер переривань (NVIC) для керування перериваннями - Архітектурно визначені режими сну: сплячий режим та глибокий сон;

- функції підтримки ОС;

- підтримка налагодження;

- простота використання.

Наприклад, NVIC – це інтегрований контролер переривань.

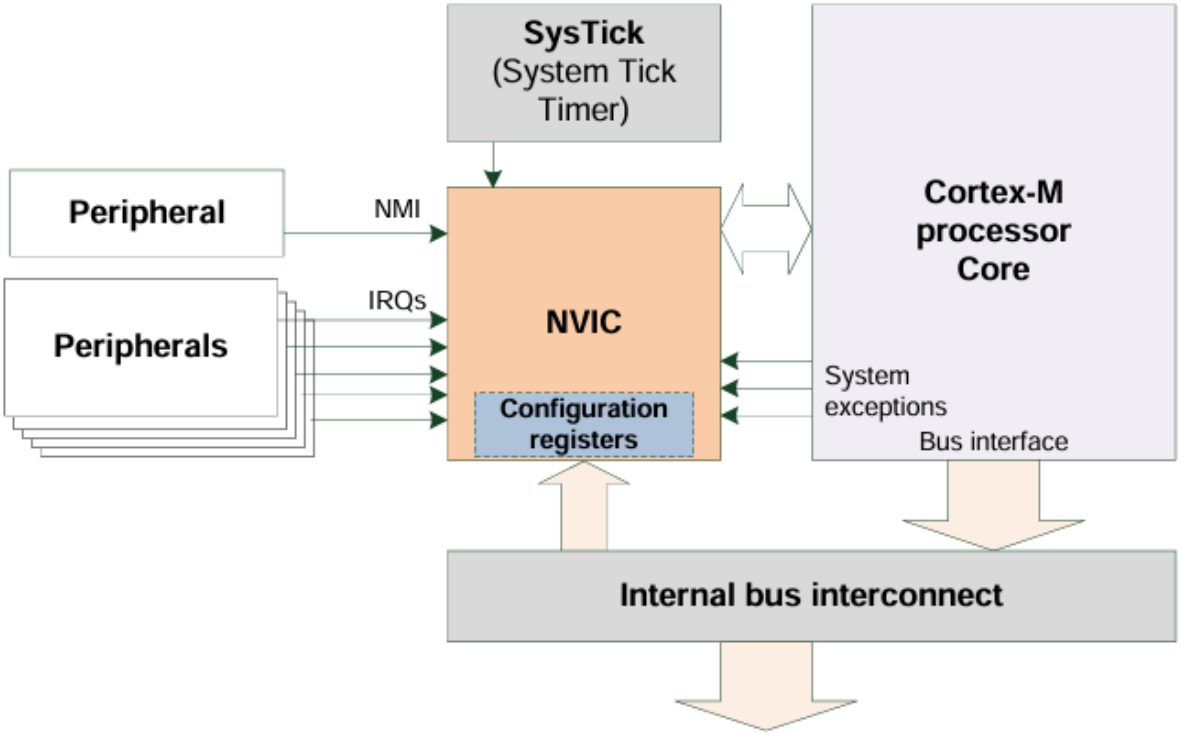



Рис.2.2 NVIC у процесорі Cortex-M

NVIC підтримує низку вхідних переривань від периферійних пристроїв, запит на немасковане переривання, запит на переривання від вбудованого таймера під назвою SysTick та низку системних винятків. NVIC обробляє керування пріоритетами та маскування цих переривань та винятків. Інші області подібності та відмінностей розглядаються в решті цього документа.

**Архітектурні особливості.**

Модель програміста. Модель програміста сімейства процесорів Cortex-M є дуже узгодженою, рис.2.3. Наприклад, R0–R15, PSR, CONTROL та PRIMASK доступні для всіх процесорів Cortex-M. Два спеціальні регістри – FAULTMASK та BASEPRI – доступні лише на Cortex-M3, Cortex-M4 та Cortex-M7, а банк регістрів з плаваючою комою та FPSCR (регістр стану та керування з плаваючою комою) доступні на Cortex-M4/M7 у додатковому блоці з плаваючою комою [19].

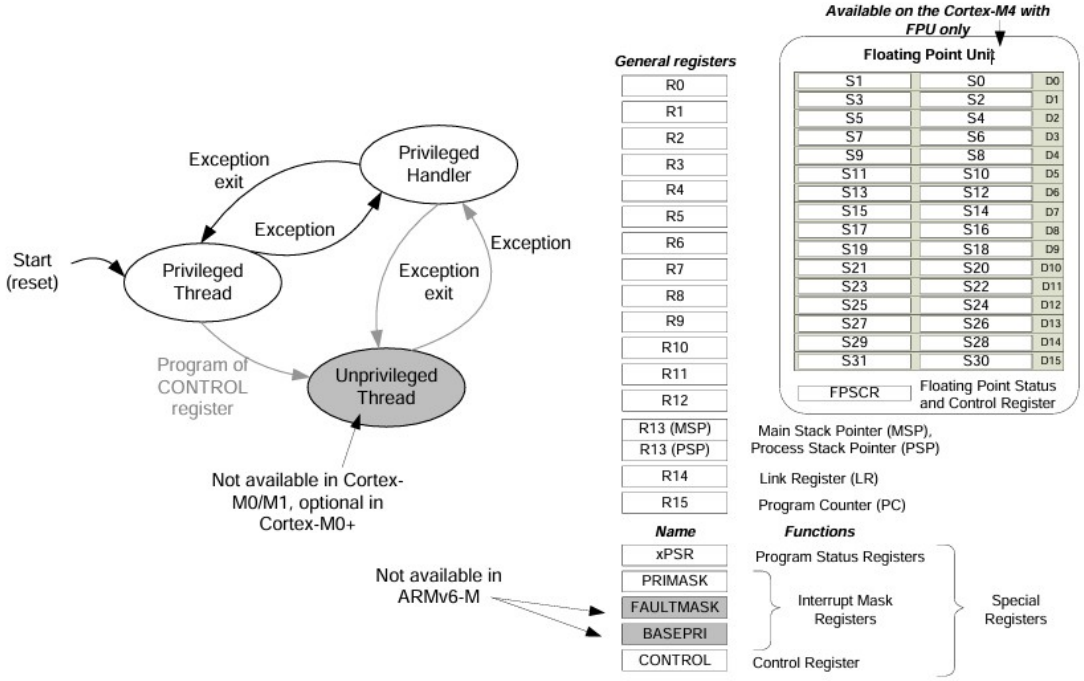



Рис.2.3 Модель програміста

Регістр BASEPRI дозволяє блокувати винятки та переривання певного рівня пріоритету або нижчих пріоритетів. Це може бути важливим в ARMv7-M, оскільки на Cortex-M3, Cortex-M4 та Cortex-M7 можна мати велику кількість рівнів пріоритету, тоді як на ARMv6-M він обмежений чотирма програмними рівнями. FAULTMASK зазвичай використовується в складних обробниках помилок.

Непривілейований рівень виконання є необов'язковим в ARMv6-M і завжди доступний в ARMv7-M. На Cortex-M0+ це необов'язково і недоступно на Cortex-M0 та Cortex-M1. Ця ризнице означає, що регістр CONTROL може мати незначні відмінності між різними процесорами Cortex-M. Опція FPU також впливає на регістр CONTROL, як показано на рис.2.4.

| | | 31:3 | 2 | 1 | 0 |
|---|---|---|---|---|---|
| ARMv6-M | CONTROL | | | SPSEL | nPRIV |
| Cortex-M3 | CONTROL | | | SPSEL | nPRIV |
| Cortex-M4/M7 with FPU | CONTROL | | FPCA | SPSEL | nPRIV |

Рис.2.4 Регістр CONTROL

Ще однією відмінністю між моделлю програміста є деталі PSR (регістр стану програми). У всіх процесорах Cortex-M PSR можна поділити на PSR застосування, PSR виконання та PSR переривань. Біт Q в APSR та біти ICI/IT в EPSR недоступні в ARMv6-M, а біти GE доступні лише в ARMv7E-M (наприклад, Cortex-M4). Крім того, ширина номера переривання в IPSR має менший діапазон в ARMv6-M. Це показано на рис.2.5.



| | 31 | 30 | 29 | 28 | 27 | 26:25 | 24 | 23:20 | 19:16 | 15:10 | 9 | 8 | 7 | 6 | 5 | 4:0 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| ARMv6-M (Cortex-M0/M0+) | N | Z | C | V | | | T | | | | | | | | | |
| ARMv7-M (Cortex-M3) | N | Z | C | V | Q | ICI/IT | T | | | ICI/IT | | Exception Number | | | | |
| ARMv7E-M (Cortex-M4/M7) | N | Z | C | V | Q | ICI/IT | T | | GE[3:0] | ICI/IT | | Exception Number | | | | |

Рис.2.5 Відмінності PSR

Варто зауважити, що модель програміста Cortex-M відрізняється від класичних процесорів ARM, таких як ARM7TDMI. Окрім банку регістрів, визначення «режиму» та «стану» класичного процесора ARM відрізняються в Cortex-M. У Cortex-M є лише два режими: Потік та Обробник, а процесори Cortex-M завжди працюють у стані Thumb (інструкції ARM не підтримуються).

**Модель винятків та NVIC.**

Усі процесори Cortex-M включають вкладений контролер векторних переривань (NVIC) та використовують одну й ту ж модель винятків. Коли виник виняток, який має вищий пріоритет, ніж поточний рівень, і не блокується жодними маскувальними регістрами, процесор приймає переривання/виняток та додає 8 регістрів до поточного стеку. Цей механізм стекування дозволяє писати обробники переривань як звичайні функції C та дозволяє багатьом невеликим функціям переривань негайно розпочати фактичну роботу, оскільки подальше стекування не потрібне. Деякі переривання та системні винятки, доступні в ARMv7-M, недоступні в ARMv6-M, рис2.6.

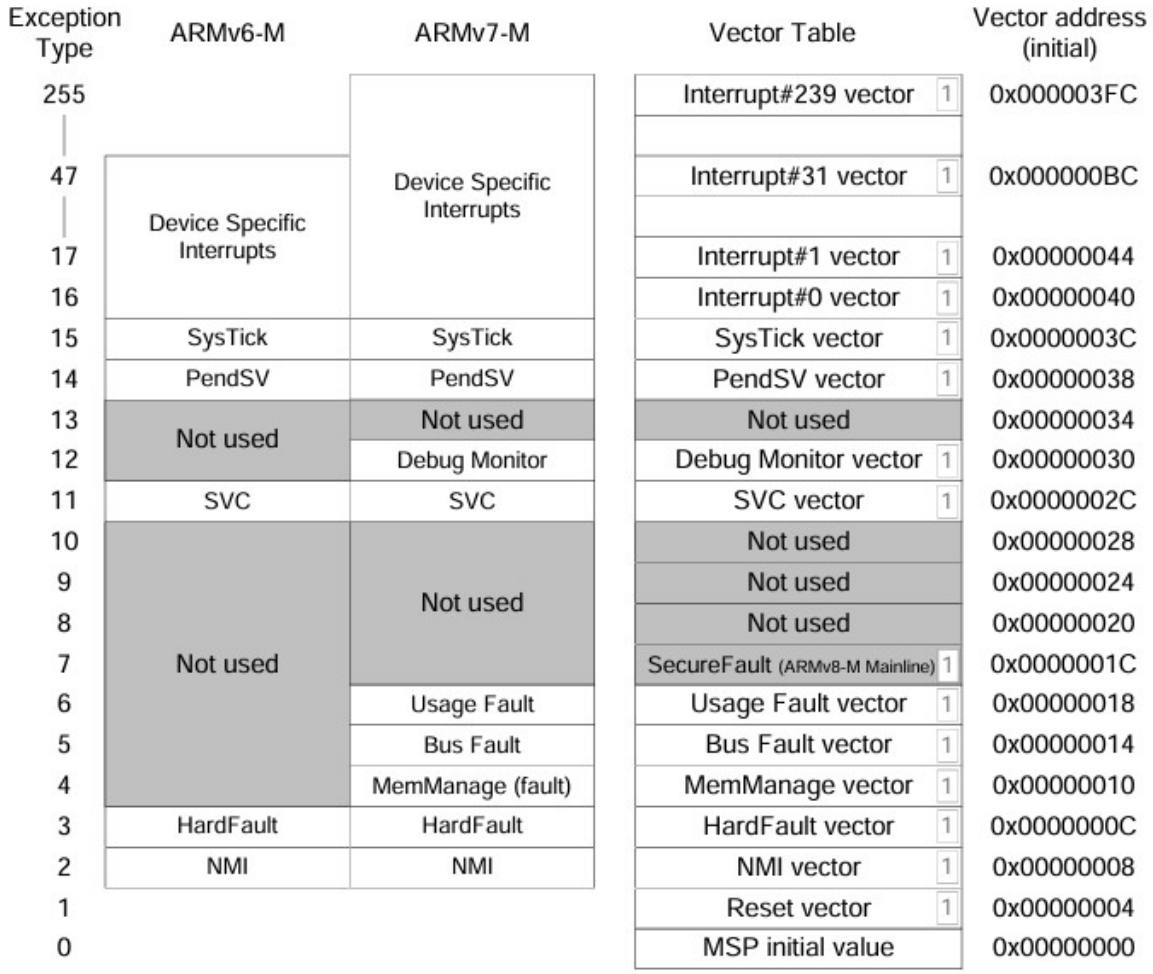



Рис.2.6 Тип винятку в процесорах Cortex-M

Наприклад, у Cortex-M0, M0+ та M1 кількість переривань обмежена 32, немає винятку Debug Monitor, а виняток помилки обмежений HardFault (див. розділ 3.4 для отримання детальної інформації про обробку помилок). Натомість процесори Cortex-M3, Cortex-M4 та Cortex-M7 підтримують до 240 периферійних переривань. Ще одна відмінність полягає в кількості доступних рівнів пріоритету. В архітектурі ARMv6-M рівень пріоритету переривань/винятків містить 2 фіксовані рівні (для NMI та HardFault) та чотири програмовані рівні (2 біти на регістр рівня пріоритету). Цього достатньо для більшості застосувань мікроконтролерів. В ARMv7-M кількість програмованих рівнів пріоритету коливається від 8 рівнів (3 біти) до 256 (8 бітів). На практиці більшість пристроїв реалізують лише від восьми (3 біти) до 16 рівнів (4 біти) через розмір кремнію. ARMv7-M також має функцію, яка називається групуванням пріоритетів, яка дозволяє розділити регістри рівнів пріоритету на

груповий пріоритет та підпріоритет, щоб можна було детально визначити поведінку витягування [20].

Усі процесори Cortex-M покладаються на таблицю векторів під час обробки винятків. Таблиця векторів зберігає початкову адресу обробника винятків і за замовчуванням вона розташована на початку карти пам'яті (адреса 0x0, як показано на рисунку 8). Початкову адресу таблиці векторів можна змінити за допомогою функції під назвою Регістр зміщення таблиці векторів (VTOR). Це корисна функція для:

- переміщення таблиці векторів до SRAM, щоб дозволити динамічно змінювати точки входу обробника винятків

- переміщення таблиці векторів до SRAM для швидшого вибору векторів (якщо флеш-пам'ять повільна)

- переміщення таблиці векторів до іншої в ROM (або флеш-пам'яті), щоб різні етапи виконання програми могли мати різні обробники винятків.

VTOR доступний на процесорах Cortex-M0+/M3/M4/M7 та ARMv8-M (опціонально на CortexM0+ та ARMv8-M Baseline). Моделі програматора NVIC також мають деякі додаткові відмінності між різними процесорами Cortex-M. Відмінності наведено в табл.2.2.

Таблиця 2.2

Відмінності між моделями та функціями програматорів NVIC

| | Cortex-M0 | Cortex-M0+ | Cortex-M1 | Cortex-M3/M4/M7 |
|---|---|---|---|---|
| Кількість переривань | до 32 | до 32 | до 32 | до 240 |
| NMI | Так | Так | Так | Так |
| SysTick | Так (необов'язково) | Так (необов'язково) | Так (необов'язково) | Так |
| Обробники помилок | 1 (Складна помилка) | 1 (Складна помилка) | 1 (Складна помилка) | 4 |
| VTOR | - | Так (необов'язково) | - | Так |
| Монітор DBG | - | - | - | Так |
| Програмовані рівні пріоритету | 4 | 4 | 4 | від 8 до 256 |

Продовження таблиці 2.2

Відмінності між моделями та функціями програматорів NVIC

| | Cortex-M0 | Cortex-M0+ | Cortex-M1 | Cortex-M3/M4/M7 |
|---|---|---|---|---|
| Регістр переривань програмного тригера | - | - | - | Так |
| Активний стан переривання | - | - | - | Так |
| Реєстрація доступу | 32-бітний | 32-бітний | 32-бітний | 8/16/ 32-бітний |
| Динамічна зміна пріоритетів | - | - | - | Так |

У більшості випадків доступ до функції керування перериваннями в NVIC здійснюється за допомогою API, що надаються в CMSISCore, який включено до бібліотеки драйверів пристроїв від постачальника мікроконтролера. Однак у Cortex-M3/M4/M7 можна змінювати пріоритет переривання, навіть якщо воно ввімкнено. Ця динамічна зміна рівня пріоритету не підтримується в ARMv6-M, тому вам потрібно тимчасово вимикати переривання під час зміни його рівня пріоритету.

## 2.3 Огляд технічних особливостей мікроконтролера STM32 Cortex-M4

Процесор Cortex-M4 розроблено для задоволення потреб ринків цифрового керування сигналами, які вимагають ефективного та простого у використанні поєднання можливостей керування та обробки сигналів, рис.2.7. Поєднання високоефективної функціональності обробки сигналів з перевагами низького енергоспоживання, низької вартості та простоти використання сімейства процесорів Cortex-M задовольняє багато ринків. Ці галузі включають ринки керування двигунами, автомобільної промисловості, управління живленням, вбудованого аудіо та промислової автоматизації.

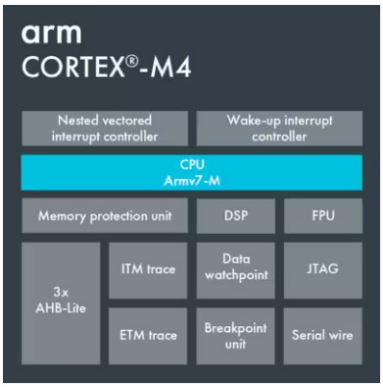



Рис.2.7 Блок-схема процесора Cortex-M4

Таблиця 2.3

Особливості процесора Cortex-M4

| Функція | Опис |
|---|---|
| Архітектура | Armv7E-M |
| Інтерфейс шини | 3 інтерфейси AMBA AHB-Lite |
| Підтримка ISA | Thumb/Thumb-2 |
| Трубопровід | 3-етапна + розгалужена спекуляція |
| Розширення DSP | Одноцикловий 16/32-бітний MAC<br>Одноцикловий подвійний 16-бітний MAC |
| Одиниця обчислень з плаваючою комою | Додатковий блок з плаваючою комою одинарної точності (FPU), сумісний з IEEE 754 |
| Захист пам'яті | Додатковий 8-регіональний MPU з підрегіонами та фоновою областю |
| Маніпуляції з бітами | Інтегровані інструкції обробки бітового поля та бітове смугування на рівні шини |
| Переривання | Немасковане переривання (NMI) + від 1 до 240 фізичних переривань |
| Рівні пріоритету переривань | Від 8 до 256 рівнів пріоритету |
| Контролер переривань пробудження | Необов'язково |
| Режими сну | Інтегровані інструкції WFI та WFE, а також функція сну при виході.<br>Сигнали сну та глибокого сну. |
| Налагодження | Додаткові порти налагодження JTAG та послідовний інтерфейс Wire, до 8 точок зупинки та 4 точок спостереження |
| Трасувати | Додаткова трасування інструкцій (ETM), трасування даних (DWT) та трасування інструментів (ITM) |

Процесор Cortex-M4 — це процесор з низьким енергоспоживанням, який характеризується низькою кількістю вентилів, низькою затримкою переривань та низькою витратою налагодження. Cortex-M4 з FPU — це процесор з тими ж можливостями, що й процесор Cortex-M4, і включає функціональність арифметики з плаваючою комою. Обидва процесори призначені для глибоко вбудованих програм, які потребують швидкої реакції на переривання [21].

Процесор Cortex-M4 включає:

- ядро процесора;

- вкладений контролер векторних переривань (NVIC), тісно інтегрований з ядром процесора для досягнення низької затримки обробки переривань;

- кілька високопродуктивних шинних інтерфейсів;

- недороге рішення для налагодження з додатковою можливістю: реалізація точок зупинки та виправлень коду, реалізація точок спостереження, трасування та профілювання системи, підтримка налагодження в стилі printf, міст до аналізатора портів трасування (tpa) ;

- додатковий блок захисту пам'яті (MPU);

- блок обчислень з плаваючою комою (FPU) у процесорі Cortex-M4 з FPU, рис.2.8.

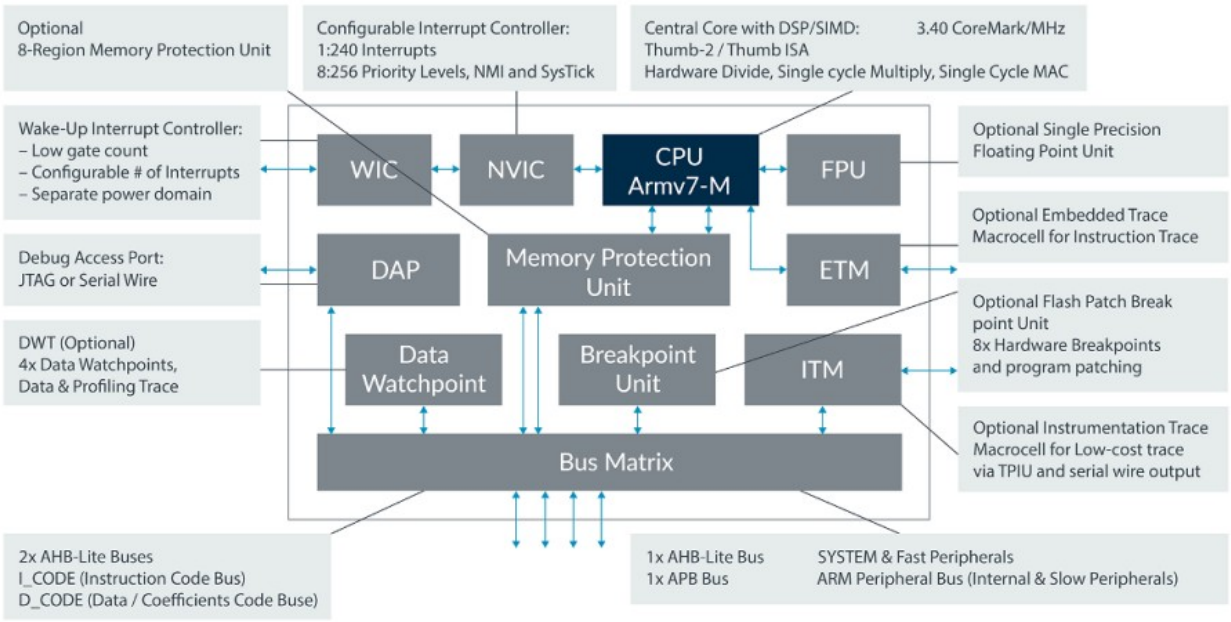



Рис. 2.8 Компоненти процесора Cortex-M4

**Компоненти Cortex-M4.**

Процесор. Процесор Cortex-M4 має ядро з низькою кількістю вентилів та низькою затримкою обробки переривань, яка має:

- підмножину набору інструкцій Thumb, визначеного в архітектурі Armv7M;
- вказівник стека (SP);
- інструкції апаратного ділення, SDIV та UDIV;
- режими обробника та потоку;
- стани Thumb та Debug;
- підтримку інструкцій з перериванням LDM, STM, PUSH та POP для низької затримки переривань;
- автоматичне збереження та відновлення стану процесора для обробки переривань з низькою затримкою;
- вхід та вихід з підпрограми (ISR);
- підтримку доступу Armv6 з байт-інваріантним або little-endian;
- підтримку невирівняного доступу Armv6.

Блок обчислень з плаваючою комою (FPU) в Cortex-M4 з процесором FPU, що забезпечує:

- 32-бітні інструкції для операцій обробки даних одинарної точності (C float)
- комбіновані інструкції множення та накопичення для підвищення точності (Fused MAC);
- апаратна підтримка перетворення, додавання, віднімання, множення з додатковим накопиченням, діленням та квадратним коренем;
- апаратна підтримка денормалізації та всіх режимів округлення IEEE;
- 32 виділені 32-бітні регістри одинарної точності, також адресовані як 16 регістрів подвійних слів;
- розділений триетапний конвеєр.

Вкладений контролер векторних переривань.

Вкладений контролер векторних переривань (NVIC) тісно інтегрований з ядром процесора для досягнення низької затримки обробки переривань. Функції включають:

- зовнішні переривання, які можна налаштувати від 1 до 240;

- біти пріоритету, які можна налаштувати від 3 до 8;

- динамічне переприоритетування переривань;

- групування пріоритетів(Це дозволяє вибирати рівні переривань з випередженням та рівні переривань без випередження);

- підтримка ланцюжування хвостів та запізнення надходження переривань (це дозволяє послідовну обробку переривань без накладних витрат на збереження та відновлення стану між перериваннями);

- стан процесора автоматично зберігається при вході переривання та відновлюється при виході з переривання, без накладних витрат інструкцій;

- додатковий контролер переривань пробудження (WIC), що забезпечує наднизьке енергоспоживання підтримка режиму сну.

**Інтерфейс ETM.**

Інтерфейс ETM забезпечує просте підключення ETM до процесора. Він забезпечує канал для трасування інструкцій до ETM.

**Інтерфейс макрокомірки трасування AHB.**

Інтерфейс макрокомірки трасування AHB (HTM) забезпечує просте підключення макрокомірки трасування AHB до процесора. Він забезпечує канал для трасування даних до HTM.

Ваша реалізація повинна включати цей інтерфейс для використання інтерфейсу HTM. Ви повинні встановити TRCENA на 1 у регістрі винятків налагодження та керування моніторингом (DEMCR), перш ніж увімкнути HTM, щоб порт HTM міг надавати дані трасування.

**Інтерфейс порту налагодження AHB-AP.**

Процесор містить інтерфейс порту доступу до шини Advanced High-Performance Bus Access Port (AHB-AP) для доступу до налагодження. Зовнішній компонент порту налагодження (DP) отримує доступ до цього інтерфейсу.

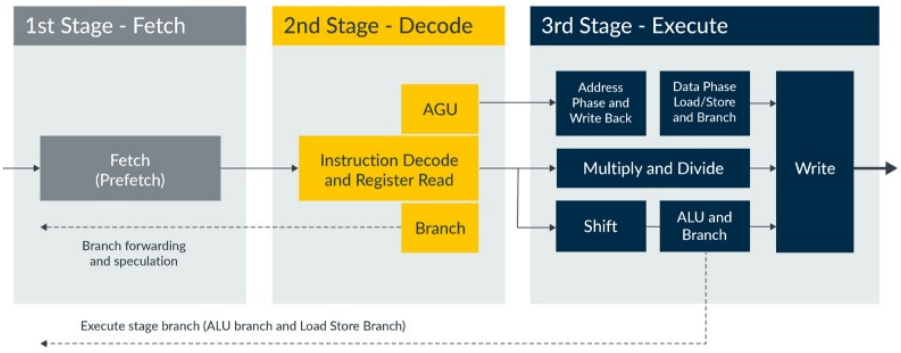



Рис.2.9 Конвеєр процесора Cortex-M4

Параметри конфігурації процесора.

Процесор Cortex-M4 має налаштовувані параметри, які можна налаштувати на етапах впровадження та інтеграції відповідно до ваших функціональних вимог, табл.2.4.

Таблиця 2.4

Параметри процесора Cortex-M4

| Функція | Опції |
|---|---|
| Кількість переривань | Визначає кількість переривань (1-240 переривань) |
| Рівні пріоритету переривань | Від 3 до 8 біт пріоритету переривань, від 8 до 256 рівнів пріоритету |
| MPU присутній | Без мікропроцесора |
| | MPU присутній |
| ФПУ присутній | Без графічного процесора |
| | FPU присутній |
| Бітове бенчування | Вказує, чи присутнє бітове смугування |
| Контроль AHB | Визначає, чи зберігають шини AB-Lite керуючу інформацію під час передач у стані очікування. |
| Рівень налагодження | Визначає рівень підтримки налагодження (від 0 до 3) |
| Рівень трасування | Визначає рівень підтримки трасування (від 0 до 3) |
| Скинути всі регістри | Визначає, чи скидаються всі синхронні стани, чи лише архітектурно необхідний стан |
| JTAG присутній | Вмикає або вимикає JTAG-частину порту налагодження |
| Годинникова брама | Визначає, чи включено архітектурні логічні вентилі годинника |
| Спостереження | Дозволяє спостерігати за внутрішнім станом процесора |
| WIC презентує | Вказує, чи присутній WIC |
| Лінії WIC | Кількість ліній WIC (мінімум 2) |

**Огляд технічного опису та переваг STM32F469.**

Мікроконтролер STM32F469, який базується на високопродуктивній архітектурі процесора ARM Cortex-M4, надзвичайно швидкий і пропонує величезний асортимент функцій і периферійних пристроїв.

STM32F4, або, точніше, STM32F469, має деякі переваги. Фактично, одна з пропонованих функцій зазвичай доступна лише на дорожчих мікропроцесорах. Жоден інший мікроконтролер на ринку не пропонує такої розширеної функції (читайте далі, щоб дізнатися про неї більше).

Технічний опис STM32F469 має колосальні 216 сторінок, і в цьому чіпі закладено багато технологій. Звісно, ми не будемо розглядати весь технічний опис, а натомість зосередимося лише на першій сторінці, де детально описані всі ключові характеристики.

STM32F469 базується на процесорному ядрі ARM Cortex-M4. STM32F030, був базований на процесорі Cortex-M0.

Cortex-M4 — це набагато просунутіше ядро, ніж M0. По-перше, Cortex-M4 виконує більше завдань за кожен такт.

Наприклад, якщо порівняти процесор M0 з процесором M4 з точно такою ж тактовою частотою, M4 працюватиме приблизно на 50% краще, ніж M0 (на основі тестів продуктивності).

Іншою ключовою особливістю, яка відрізняє процесори Cortex-M4 від менш просунутих, є додавання блоку обчислень з плаваючою комою (FPU).

FPU — це окреме ядро процесора, яке іноді називають математичним співпроцесором, спеціально розроблене для виконання математичних функцій з числами з плаваючою комою.

Не всі версії Cortex-M4 містять FPU. Офіційно Cortex-M4F – це правильне позначення для ядер M4 з FPU. Але це не дотримується суворо, і багато постачальників називають процесор M4 з FPU просто Cortex-M4.

Ще однією особливістю, яка дійсно відрізняє цей мікроконтролер від більшості інших варіантів, є наявність вбудованого контролера зовнішньої пам'яті.

Це дозволяє додати зовнішню високошвидкісну оперативну пам'ять, яка взаємодіятиме з мікроконтролером через надшвидку 32-бітну шину даних.

Можливість взаємодії із зовнішньою оперативною пам'яттю зазвичай є сферою високопродуктивних мікропроцесорів, а не мікроконтролерів. Мікроконтролери, як правило, мають всю оперативну пам'ять вбудовану, що є однією з багатьох причин, чому проектування за допомогою мікроконтролера є набагато простішим процесом.

Але бувають випадки, коли можливість додавання додаткової швидкої позачіпної оперативної пам'яті буде великою перевагою. Наприклад, для використання в якості буфера кадрів у відеозастосунках.

Хоча це може значно ускладнити конструкцію, якщо вам потрібен великий обсяг високошвидкісної оперативної пам'яті, то STM32F469 це підтримують, рис.2.10.

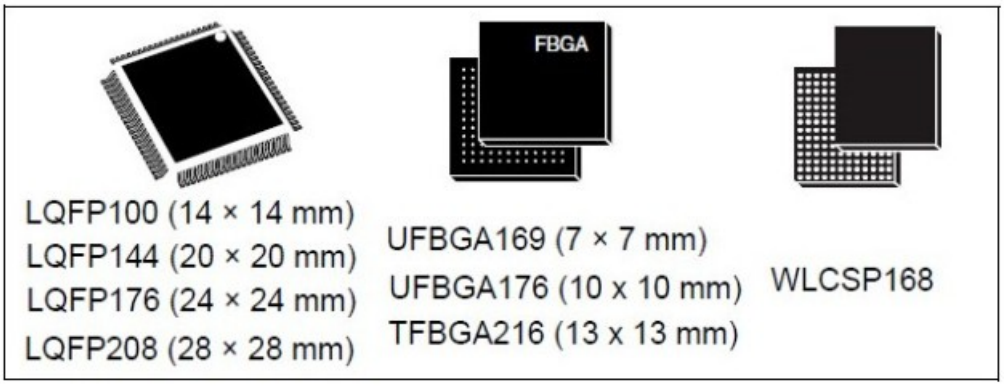



Рис.2.10 Типи корпусів STM32F469

Контролер зовнішньої пам'яті підтримує різні типи оперативної пам'яті, включаючи SRAM (статичну оперативну пам'ять), PSRAM (псевдостатичну оперативну пам'ять) та SDRAM (синхронну динамічну оперативну пам'ять). Він також підтримує флеш-пам'ять на основі NOR/NAND.

Ще однією особливістю, яка відрізняє цей мікроконтролер від мікроконтролерів початкового рівня, є те, що він також включає контролер Ethernet.

Для реалізації функціональності Ethernet потрібні як рівень MAC (Media Access Control), так і рівень PHY (фізичний). Рівень MAC вбудований у мікроконтролер, але для рівня PHY все ще потрібен зовнішній приймач Ethernet.

STM32F469 доступний у трьох типах корпусів: QFP, BGA та CSP з різною кількістю контактів залежно від кількості контактів GPIO.

Якщо невеликий розмір не є абсолютно критично важливим для вашого продукту, у більшості випадків рекомендується корпус QFP. Це тому, що це корпус з виводами, тому до всіх контактів легко дістатися. Це може бути критично важливим для цілей налагодження. Корпуси з виводами також дешевші для припаювання до друкованої плати.

BGA (кулькова сітка) має всі контакти на дні корпусу у вигляді сітки. Це дозволяє зменшити розміри мікросхем, особливо для тих, що потребують великої кількості контактів. Але це також ускладнює компонування друкованої плати.

З'єднання всіх цих близько розташованих контактів вимагає друкованої плати з більшою кількістю шарів. Це збільшує вартість друкованої плати. Крім того, паяння корпусу BGA на друкованій платі коштує дорожче, ніж корпусу QFP з виводами.

Таким чином, корпуси BGA дозволяють використовувати меншу друковану плату, але за рахунок додаткової складності проектування та витрат на виробництво.

CSP (корпус масштабу мікросхеми) розвиває концепцію BGA ще на один крок. Він повністю позбавляється пластикового корпусу, що дозволяє досягти абсолютно мінімально можливого розміру [22].

Корпус CSP має всі ті ж недоліки, що й корпус BGA, тому використовуйте його лише тоді, коли вам абсолютно необхідно зменшити розмір плати до мінімуму.

### 2.4. Застосування Cortex-M та Інтернет речей

У даному підрозділі розглянуто, як конструкції процесорів Cortex-M відповідають вимогам сценаріїв Інтернету речей (IoT), і як екосистеми ARM, такі як

CMSIS та проміжне програмне забезпечення, розвиваються, щоб забезпечити розвиток IoT. Також розглянуто проблеми досягнення IoT та нові можливості, що створюються вимогами IoT.

Відповідність вимогам IoT-застосунків. Процесори ARM Cortex-M добре підходять для широкого спектру застосувань, включаючи IoT-застосунки. У більшості типових IoT-застосунків ми можемо знайти такі системні вимоги до процесора:

- низьке енергоспоживання;
- висока щільність коду;
- висока продуктивність;
- обсяг пам'яті та режими адресації;
- зручність для ОС;
- безпека.

**Низьке енергоспоживання.**

З точки зору користувача, багато IoT-систем «завжди увімкнені». На практиці процесори або мікроконтролери можуть перебувати в режимі сну більшу частину часу та регулярно прокидатися для декодування отриманих даних Ethernet, обробки необхідних даних та планування завдань ОС. Хоча багато з них можуть бути постійно підключені до основного джерела електроживлення, споживання енергії системою може бути значним протягом тривалого періоду часу. Втрата енергії може бути значною, якщо процесор не має гарної енергоефективності або низького енергоспоживання в режимі очікування. І, очевидно, вимога низького енергоспоживання набагато критичніша для продуктів, що працюють від батарейок.

Процесори Cortex-M розроблені з урахуванням високої енергоефективності та забезпечують різні функції низького енергоспоживання, включаючи архітектурні режими сну, підтримку синхронізації, багаторівневі домени живлення тощо. Це дозволяє мікроконтролерам, розробленим з процесорами Cortex-M, підтримувати низьке активне енергоспоживання, а також наднизьке енергоспоживання в режимі очікування в режимах сну, не жертвуючи продуктивністю та функціями. Процесор з

нижчим енергоспоживанням також має потенційні додаткові переваги, зменшуючи витрати на необхідне джерело живлення та знижуючи рівень електромагнітних перешкод (EMI). У багатьох бездротових та критично важливих для безпеки застосуваннях низький рівень електромагнітних перешкод є критично важливим. Це не тільки може покращити якість бездротового зв'язку, але й дозволяє зменшити потужність, необхідну для передачі даних, та зменшити ризик виникнення перешкод для інших пристроїв, що особливо важливо в медичних та авіаційних застосуваннях [23].

**Висока щільність коду**

Усі процесори Cortex-M базуються на технології Thumb-2. Набір інструкцій Thumb забезпечує поєднання 16- та 32-бітних інструкцій в одному робочому стані, і в більшості випадків 16-бітні інструкції використовуються для кращої щільності коду. Висока щільність коду дозволяє розробнику реалізувати систему з мікроконтролером, використовуючи меншу флеш-пам'ять, що може знизити вартість продукту Інтернету речей. Це також може зменшити споживання енергії мікроконтролером, оскільки зменшується необхідний розмір флеш-пам'яті. Оскільки більшу частину часу використовуються 16-бітні інструкції, процесору часто потрібно отримувати інструкції лише через кожен такт. Це зменшує споживання енергії системою, а також дозволяє збільшити пропускну здатність шини для інших операцій передачі даних. Це може бути важливим у пристроях зі швидким інтерфейсом Ethernet, оскільки в системі може бути присутній контролер DMA, якому потрібна пропускна здатність шини для передачі даних між пам'яттю та інтерфейсом Ethernet.

**Висока продуктивність**

Усі процесори Cortex-M є 32-бітними процесорами та пропонують набагато вищу продуктивність, ніж багато 8- та 16-бітних мікроконтролерів. Хоча можливо реалізувати продукт Інтернету речей, використовуючи застарілі 16-бітні або навіть 8-бітні мікроконтролери, використання 32-бітних процесорів має низку переваг: завдяки високій обчислювальній потужності він дозволяє пристрою Інтернету речей працювати надійніше, навіть якщо обсяг мережевої активності, що

генерується кінцевим продуктом, може бути непередбачуваним. Якщо мережева активність вища, ніж очікувалося, пристрій Інтернету речей, розроблений з використанням мікроконтролера з низькою продуктивністю, може не впоратися та вийти з ладу. Використання 32-бітного мікроконтролера забезпечує достатній запас продуктивності для обробки неочікуваного мережевого трафіку. У деяких випадках це також може забезпечити кращий шанс для пристрою Інтернету речей пережити DoS-атаку. Мікроконтролер з вищою продуктивністю також може надати можливість включення додаткових заходів безпеки, таких як шифрування та авторизація. Ці функції забезпечують кращий захист для кінцевих користувачів і повинні бути розгорнуті, якщо пристрій Інтернету речей обробляє будь-які конфіденційні або персональні дані. Очевидно, що краща продуктивність також забезпечує кращий користувацький досвід. Наприклад, ви можете легко керувати графічним інтерфейсом користувача та вмикати кращий набір функцій у своїх продуктах.

**Обсяг пам'яті та режими адресації.**

Коли обсяг інтернет-активності збільшується в пристрої Інтернету речей, часто потрібно більше пам'яті для обробки додаткових даних для обробки мережевих пакетів. Крім того, зростання вимог до функцій продуктів Інтернету речей означає, що вам може знадобитися більше місця в пам'яті для розміщення образу програми. Як результат, наявність більшого адресного простору пам'яті може бути корисним для надійності системи, а також для продуктивності продукту Інтернету речей. Однак у більшості 8- та 16-бітних мікроконтролерів архітектура підтримує лише до 64 КБ або 128 КБ загального простору пам'яті. Це може стати основним обмеженням для потенційних функцій, доступних у продуктах Інтернету речей. У мікроконтролерах Cortex-M архітектура використовує 32-бітну лінійну адресу та дозволяє використовувати до 4 ГБ загального простору пам'яті. Немає потреби використовувати будь-яку техніку сторінкового підкачувань пам'яті, що забезпечує кращу продуктивність та спрощує розробку програмного забезпечення в мікроконтролерах Cortex-M при роботі з більшим простором пам'яті. Процесори Cortex-M підтримують різні режими адресації доступу до пам'яті. Це робить

архітектуру зручною для C і, отже, забезпечує хорошу продуктивність, а також спрощує програмування та налагодження.

**Зручний для ОС.**

У багатьох IoT-застосунках важливо використовувати вбудовану ОС для виконання різних завдань. Архітектура процесорів Cortex-M розроблена з урахуванням підтримки ОС. Наприклад, механізм подвійного вказівника стека дозволяє легко впроваджувати ОС і водночас забезпечує ефективне використання пам'яті та надійну роботу. Процесори також включають 24-бітний таймер, призначений для генерації переривань системних тактів ОС. Ці функції спрощують перенесення ОС на різні пристрої CortexM. Для критично важливих для безпеки вбудованих застосунків вбудована ОС також може використовувати додатковий блок захисту пам'яті (MPU) для забезпечення ізоляції доступу до пам'яті. Це може запобігти пошкодженню даних будь-якою програмою в завданні іншої програми, що значно підвищує надійність системи. Наразі для процесорів Cortex-M доступно вже понад 30 вбудованих ОС, і їх кількість продовжує зростати.

**Безпека**

Окрім підвищеної надійності, додатковий MPU також забезпечує кращий захист вбудованої системи. При використанні разом із привілейованим та непривілейованим рівнями виконання багато завдань можна виконувати в непривілейованому режимі, щоб запобігти проблемам безпеки. Наприклад, стек TCP/IP можна виконувати на непривілейованому рівні. Таким чином, навіть якщо стек TCP/IP має вразливість і піддається хакерській атакі, ймовірно, що зловмисник зможе отримати лише непривілейований доступ і не зможе отримати доступ до інших областей пам'яті, захищених MPU. Висока продуктивність процесорів Cortex-M також дозволяє впроваджувати складні заходи безпеки в Інтернеті речей. Наприклад, програма може реалізувати додаткову перевірку для перевірки зовнішніх вхідних даних з Інтернету та обробляти шифрування/дешифрування передачі даних навіть без апаратних прискорювачів AES. Крім того, вища продуктивність також забезпечує більше шансів для вбудованого пристрою пережити атаку відмови в обслуговуванні (DoS). Процесори Cortex-M також мають

можливість обробки винятків помилок, яка запускає обробники винятків помилок, коли виявляються певні типи помилок. Наприклад, коли система піддається атаці та виникла помилка, така як перехід до недійсного адресного простору, спрацьовує виняток помилки, і обробник помилок може виконати коригувальні дії, такі як перезапуск системи або завершення завдання програми, що призвело до збою.

### 2.5 Огляд протоколів домашньої автоматизації

У багатьох сучасних мікроконтролерах процесор займає лише невелику частину кремнієвої площі. Решту площі часто займають флеш-пам'ять та SRAM, периферійні пристрої та інші аналогові схеми. Щоб мікроконтролер можна було використовувати в IoT-додатках, розробникам мікроконтролерів також необхідно інтегрувати різні периферійні пристрої та функції в продукти мікроконтролерів [24]. Як правило, це включає підключення, таке як інтерфейс Ethernet або WIFI, або бездротові інтерфейси зв'язку, такі як Zigbee, RFID, рис.2.11.




Рис.2.11 Протоколи домашньої автоматизації

Провідні технологічні компанії інвестують величезні кошти в дослідження та розробки, щоб створити власні підключені екосистеми для дому та офісу. Кінцева мета полягає у створенні повністю автоматизованих систем, які можуть розпізнавати та реагувати на вибраних осіб або групи користувачів у домашньому чи офісному середовищі.

**Домашня автоматизація X10.**

Одна з перших технологій керування будинком, що була представлена, x10 існує з 1975 року. X10 використовує існуючі лінії електропередач для керування лампами, побутовою технікою та моніторингу дверей і вікон. Технічно X10 трохи відстає від свого часу, і затримки між дією та реакцією помітні через використання радіочастотних сигналів. Протоколи X10 також схильні до перешкод, пов'язаних із шумом лінії, і вимагають додаткового встановлення фільтрів, з'єднувачів та ретрансляторів для мінімізації таких випадків.

У 1999 році було представлено оновлення під назвою Universal Powerline Bus (UPB), яке усуває більшість недоліків X10. UPB використовує складнішу конфігурацію, що включає унікальні ідентифікатори пристроїв, спільний доступ до мережі та індивідуальні паролі мережі, щоб забезпечити більш реалістичну та настроювану реалізацію розумного дому .

**Домашня автоматизація Zigbee.**

Протокол Zigbee , провідне ім'я в галузі технологій розумного дому, відомий своєю зручністю роботи та сумісністю зі старими версіями. Протокол, як стверджується, подовжує термін служби батареї інтелектуальних датчиків безпеки майже на сім років, забезпечуючи довгострокове рішення для домашньої безпеки. Оскільки він використовує стандартизовані вимоги до сполучення, Zigbee також сумісний з більшістю сучасних пристроїв та приладів, що знижує загальну вартість розробки для власників продуктів та розробників.

Домашня автоматизація Zigbee також має можливості самостійного налаштування, що забезпечує більшу можливість налаштування як для розробників продукту, так і для кінцевих користувачів. Ось кілька ключових особливостей Zigbee:

- віддалений доступ з моніторингом через Інтернет для керування розумним будинком;

- підтримка застосунку для смартфонів для модуляції розумних побутових приладів та пристроїв;

- інтелектуальне керування та контроль живлення для підтримуваних продуктів;

- підтримує встановлення додаткових сертифікованих пристроїв безпеки та протоколів для підвищення безпеки дому.

Дозволяє освітлювальним приладам використовувати динамічне керування освітленням, яке часто використовується для створення унікальних домашніх та офісних середовищ.

Zigbee — один з небагатьох протоколів розумного дому, який пропонує планувальникам продуктів ширші можливості налаштування. Компанія має програму сертифікації та відповідності високої доступності, щоб забезпечити безперешкодну інтеграцію сертифікованих продуктів із протоколами домашньої автоматизації Zigbee.

Завдяки своїй надзвичайно масштабованій природі, бездротовій роботі та використанню 128-бітного шифрування AES для захисту персональних даних, протокол також може використовуватися в офісному та бізнес-середовищі.

**Домашня автоматизація Insteon.**

Технологія домашньої автоматизації Insteon використовує як лінії електропередач, так і радіочастотний зв'язок для підключення до розумного будинку. Протокол вимагає перевірки всіх повідомлень, отриманих сумісним пристроєм, на наявність помилок та вносить виправлення, тим самим підвищуючи надійність функцій.

Однак, протокол Insteon та підтримувані ним продукти в минулому зазнавали певних випадків хакерських атак з боку хакерів. У багатьох випадках хакери мали доступ до розумних будинків та особистої інформації користувачів Insteon. З 2000 року ці протоколи були припинені.

**Домашня автоматизація з Wi-Fi.**

З огляду на проникнення мереж Wi-Fi у локальні мережі, це один із найзручніших протоколів для роботи розробників систем домашньої автоматизації. Протоколи Wi-Fi забезпечують готову інфраструктуру з властивою здатністю керувати великими обсягами даних. Ще однією перевагою використання протоколу Wi-Fi для домашньої та офісної автоматизації є вбудоване 256-бітове шифрування AES. Однак низька швидкість Wi-Fi та низька сила сигналу можуть бути вузьким місцем для продуктивності у великих системах домашньої автоматизації. Крім того, більшість будинків та підприємств використовують стандарт Wi-Fi 802.11n, який є занадто енергоємним для більшості програм Інтернету речей [25].

Нещодавно Wi-Fi Alliance оголосив про новий стандарт 802.11ah. Протокол, який Альянс називає Wi-Fi HaLow, може працювати на більших відстанях, ніж існуючі діапазони 2,4 ГГц та 5 ГГц – нібито до 1 кілометра за ідеальних умов – і був спеціально розроблений для впровадження Інтернету речей та автоматизації.

Хоча реальне застосування цього протоколу все ще потребує ретельного тестування, схильність діапазону 900 МГц працювати в умовах різних перешкод добре відома. Робота Wi-Fi 802.11ah на частотах менше гігагерців дозволяє краще розгортати системи "розумного будинку", "підключеного автомобіля" та "цифрової охорони здоров'я". Таким чином, теоретично, продукти, що використовують діапазон HaLow, матимуть значно кращу зону покриття. Крім того, діапазон HaLow може передавати дані з мінімальною частотою 150 Кбіт/с по каналах до 2 ГГц. Це означає, що підключені пристрої Інтернету речей можуть швидко повернутися до свого пасивного стану після пробудження для отримання інструкцій, заощаджуючи більше енергії, і таким чином долаючи одне з невід'ємних обмежень сучасних мереж Wi-Fi.

Однак обмежувальним фактором діапазону HaLow є його швидкість передачі, яка залишається в межах десятків мегабіт на секунду і може не задовольнити планувальників продуктів, яким потрібна вища пропускна здатність.

**Домашня автоматизація Bluetooth.**

Мережі Bluetooth час від часу використовуються розробниками продуктів для розумного дому як протокол домашньої автоматизації, хоча існуюча технологія залишається обмеженою своїм радіусом дії та якістю сигналу. Тим не менш, деякі пристрої розумного дому можуть використовувати сигнали Bluetooth для підключення та виконання основних завдань (залежно від рівня підтримки).

Проблеми безпеки: Основною проблемою для власників продуктів, які використовують мережі Bluetooth для домашньої автоматизації, є безпека. Існуюча технологія Bluetooth Low Energy (LE) схильна до саботажу через численні вразливості до безпеки, такі як:

- пасивне підслуховування, яке дозволяє третьому пристрою перехоплювати дані, що обмінюються між двома сполученими пристроями. Хоча BLE використовує 128-бітове шифрування AES для захисту передачі даних, все ж існують деякі недоліки протоколу, які хакери можуть використовувати для перехоплення та розшифрування персональних даних;

- атаки типу «людина посередині» або MITM, які дозволяють сторонньому пристрою вставлятися між двома легітимними пристроями, створюючи ілюзію їхнього взаємозв'язку. Перехоплення дозволяє шкідливому пристрою обдурити Gap Central та Gap Peripheral і підробити інформацію, що обмінюється;

- відстеження особи, коли третя сторона може відстежувати певного користувача, пов’язуючи адресу пристрою BLE з його пристроєм. У цьому випадку BLE має механізм періодичної зміни адреси пристрою, щоб подолати цей недолік.

Bluetooth 5 та Bluetooth Mesh : Майбутній запуск технології Bluetooth 5 та Mesh являє собою найбільше вдосконалення в технології Bluetooth з моменту її запуску. Bluetooth Mesh перетворить поточну технологію з мережевої топології «точка-точка» на зірку до справжньої мережевої топології mesh. Це розширить діапазон підтримуваних пристроїв Bluetooth за межі типових персональних мереж, які ми маємо сьогодні. Крім того, mesh дозволить розширити покриття Bluetooth за рахунок додаткових вузлів, відкриваючи можливості для продуктів розумного дому, які не прив'язані до підключення до Інтернету. Новіші стандарти Bluetooth також

використовуватимуть новіші заходи шифрування та безпеки для подолання існуючих недоліків безпеки .

**Домашня автоматизація 6LoWPAN.**

Ця абревіатура є поєднанням останньої версії протоколу IPv6 та Low-power Wireless Personal Area Networks (LoWPAN). 6LoWPAN може передавати інформацію бездротовим способом за допомогою інтернет-протоколу та спеціально призначений для підключення найменших пристроїв до Інтернету речей.

Застосунки 6LoWPAN для машинних зв'язків та Інтернету речей включають:

- 6LowPan Розумні лічильники;

- розумна побутова техніка (освітлення, термостати тощо);

- усі малопотужні пристрої, які можуть працювати поблизу сусіднього приймача-передавача.

**Протокол потоків для Інтернету речей.**

Запропонований вперше Google, Thread — це відкритий набір протоколів для рішень для розумного дому. Thread працює бездротово, використовуючи протоколи IP-адрес, подібно до 6LoWPAN, і дозволяє підключати ще більше малопотужних пристроїв у межах домашньої автоматизації. Thread використовує низку модифікацій та функцій для усунення існуючих вузьких місць в інтеграції дому шляхом:

- відкритий стандартний протокол, що передає пакети IPv6 через 6LoWPAN;

- спрощений інтерфейс користувача та підтримка як смартфонів, так і комп'ютерів для керування домашньою домашньою системою;

- захищена мережа з шифруванням AES для мінімізації витоків даних;

- споживання значно меншої кількості енергії від підключених пристроїв – це подовжує термін служби батарей підключених датчиків;

- незалежна активація вузлів, що означає відсутність єдиної точки відмови для пристроїв у мережі;

- універсальна підтримка для різноманітних пристроїв та побутової техніки.

**Домашня автоматизація ANT.**

Розроблена компанією ANT Wireless, ця система домашньої автоматизації використовує стек протоколів бездротового зв'язку. ANT дозволяє обладнанню, що працює в діапазоні ISM 2,4 ГГц, взаємодіяти за допомогою правил взаємодії.

Вузли ANT можуть одночасно діяти як ведені або головні вузли в бездротовій сенсорній мережі. Тобто вузли можуть виступати в ролі передавачів, приймачів або приймачів для маршрутизації трафіку до інших вузлів. Крім того, вузли можуть автоматично визначати час передачі на основі активності сусідніх вузлів [25].

**Домашня автоматизація EnOcean.**

Ця технологія використовується для систем автоматизації будівель, що базуються на бездротовій технології збору енергії. Модулі EnOcean – це поєднання наднизькоенергійної електроніки та перетворювачів енергії, що забезпечує зв'язок між датчиками, комутаторами/контролерами та шлюзами без живлення від батареї.

EnOcean пропонує ліцензії на свої запатентовані функції в рамках закритої системи EnOcean Alliance та знайшла багато інших застосувань (у транспорті та логістиці), окрім домашньої автоматизації.

**Найкращі протоколи для домашньої автоматизації**

Серед перелічених методів домашньої автоматизації Zigbee, 6LoWPAN, Thread та Bluetooth LE пропонують найперспективніші результати для домашньої автоматизації на основі Інтернету речей . У той час як Zigbee та 6LoWPAN широко використовуються завдяки простоті встановлення та сумісності, Bluetooth та Thread обіцяють кращу інтеграцію найближчим часом. Ось як менеджери продуктів та розробники можуть отримати вигоду від інтеграції цих протоколів у свої рішення для розумного дому.

***Zigbee:*** Дозволяє велику кількість налаштувань продукту та масштабованість. Процес інтеграції та сертифікації простий, а Zigbee також забезпечує зворотну сумісність зі старими продуктами. Крім того, протокол має вбудовані заходи безпеки, що усуває необхідність додаткових кроків від розробників продукту.

***6LoWPAN:*** Ідеально підходить для датчиків з живленням від батарей, таких як температура, дим тощо, та керування побутовою технікою, такою як пральні

машини. Надзвичайно низьке енергоспоживання цієї технології зробило її однією з найкращих технологій розумного дому.

***Bluetooth:*** Хоча домашня автоматизація Bluetooth не така зручна в своєму поточному вигляді, вона знайде широке застосування після випуску функціональності mesh-мережі. Планувальники продуктів зможуть розробляти та впроваджувати рішення для розумного дому з незалежною та взаємозалежною роботою в локальних приватних мережах.

***Thread::*** Ініціативу підтримує широка кількість постачальників апаратного та програмного забезпечення для спільної розробки розумних будинків. Її повсюдне впровадження означає швидше оновлення фреймворку, кращу безпеку та менше споживання енергії для розробників розумних будинків.

Перелік протоколів домашньої автоматизації, представлено на рис.2.12.




Рис.2.12 Протоколи домашньої автоматизації

Основні характеристики найбільш поширених протоколів детально узагальнено та систематизовано в таблиці 2.5, що дає змогу наочно порівняти їхні технічні параметри та сфери застосування.

Таблиця 2.5

Особливості та порівняння протоколів

| Зміни | Wi-Fi | Z-Wave | ZigBee | Thread | BLE |
|---|---|---|---|---|---|
| PHY/ MAC Standart | IEEE 802.11.1 | ITU-T G.9959 | IEEE 802.15.4 | IEEE 802.15.4 | IEEE 802.15.1 |
| Frecmency Band | 2.4 GHz | 900 MHz | 2.4 GHz | 2.4 GHz | 2.4 GHz |
| Nominal Range (0 dBm) | 100m | 30-100m | 10-100m | 10-100m | 30m |
| Max. Data Rate | 54 mbit/s | 40-100kbit/s | 250 kbit/s | 250 kbit/s | 1 mbit/s |
| Tpology | Start | Mesh | Mesh | Mesh | Scattemet |
| Power Usage | Hight | Low | Low | Low | Low |
| Alliance | Wi-Fi Alliance | Z-Wave Alliance | ZigBee Alliance | Thread Group | Bluetooth SIG |

# 3 ПРАКТИЧНА РЕАЛІЗАЦІЯ ДОМАШНЬОГО ЦЕНТРУ КЕРУВАННЯ ІЗ ЗАСТОСУВАННЯМ STM32

Розумний дім – це апаратна система, яка забезпечує підключення та зв’язок між іншими пристроями в мережі домашньої автоматизації. До цих пристроїв належать термостати, лампочки, розетки та вимикачі, дверні замки, монітори енергії, віконні штори, побутова техніка, датчики руху тощо. Хоча ці пристрої забезпечують зручні функції для користувачів, така зручність може мати вищий вплив, наприклад, витік особистої інформації користувача. Завдяки інтелектуальному хабу всіма цими розумними пристроями можна керувати за допомогою одного додатку.

Центр розумного дому є апаратний пристрій, який виступає центральною точкою системи розумного дому та може сприймати, обробляти дані та бездротово взаємодіяти.

## 3.1 Огляд та вибір середовища розробки додатків керування

Вибір середовища розробки є одним із ключових етапів у процесі проєктування програмно-апаратних систем, оскільки помилкове рішення на цьому етапі може призвести до істотних витрат часу та ускладнити подальшу модернізацію програмного забезпечення. Під час аналізу були розглянуті як традиційні інтегровані середовища розробки (IDE), так і різноманітні онлайн-платформи, орієнтовані на створення мобільних застосунків.

Android Studio являє собою повнофункціональне інтегроване середовище, призначене для розробки застосунків під операційну систему Android, офіційним розробником якого є компанія Google. У середовище вбудовано емулятор, що забезпечує можливість тестування застосунків на віртуальних пристроях із різними параметрами екрана. Крім того, Android Studio дозволяє виконувати оцінювання

показників продуктивності застосунку на різних типах апаратних платформ, що є важливим під час оптимізації програмного коду [22].

Розроблення мобільних застосунків на основі онлайн-сервісів суттєво відрізняється від роботи в середовищах IDE. Такі платформи надають користувачеві можливість формувати інтерфейс шляхом вибору готових компонентів, тоді як логіка роботи задається за допомогою блокового програмування. Перевагою подібних сервісів є висока швидкість і доступність процесу створення застосунку, проте їх функціональні можливості зазвичай є обмеженими.

MIT App Inventor є безкоштовним онлайн-інструментом для розробки мобільних застосунків для операційної системи Android. Інтерфейс головного вікна MIT App Inventor наведено на рис. 3.1.




Рис.3.1 MIT App Inventor

Thunkable є безоплатною онлайн-платформою, призначеною для створення мобільних застосунків під операційні системи Android та iOS. Розробником даного сервісу виступає компанія Thunkable. Платформа забезпечує користувача широким набором типових шаблонів інтерфейсів і застосунків, що дає змогу істотно скоротити загальний час розробки [27].

Створення застосунку в Thunkable здійснюється шляхом використання візуального інтерфейсу на основі технології drag-and-drop, що дозволяє швидко формувати компонування екранів і додавати функціональні елементи, зокрема кнопки, текстові поля та інші елементи управління. Додатковою перевагою є наявність режиму попереднього перегляду в реальному часі, який забезпечує можливість оперативно оцінювати вигляд і поведінку застосунку безпосередньо на мобільному пристрої під час розроблення.

Платформа підтримує розгортання проєктів як для iOS, так і для Android, що підвищує її універсальність і робить одним із зручних інструментів для створення кросплатформних мобільних рішень. Інтуїтивний інтерфейс і візуальна модель програмування зумовлюють популярність сервісу серед студентів, початківців та власників малого бізнесу, які прагнуть розробити власний мобільний застосунок без глибоких знань програмування. Головне робоче вікно Thunkable наведено на рис. 3.2.

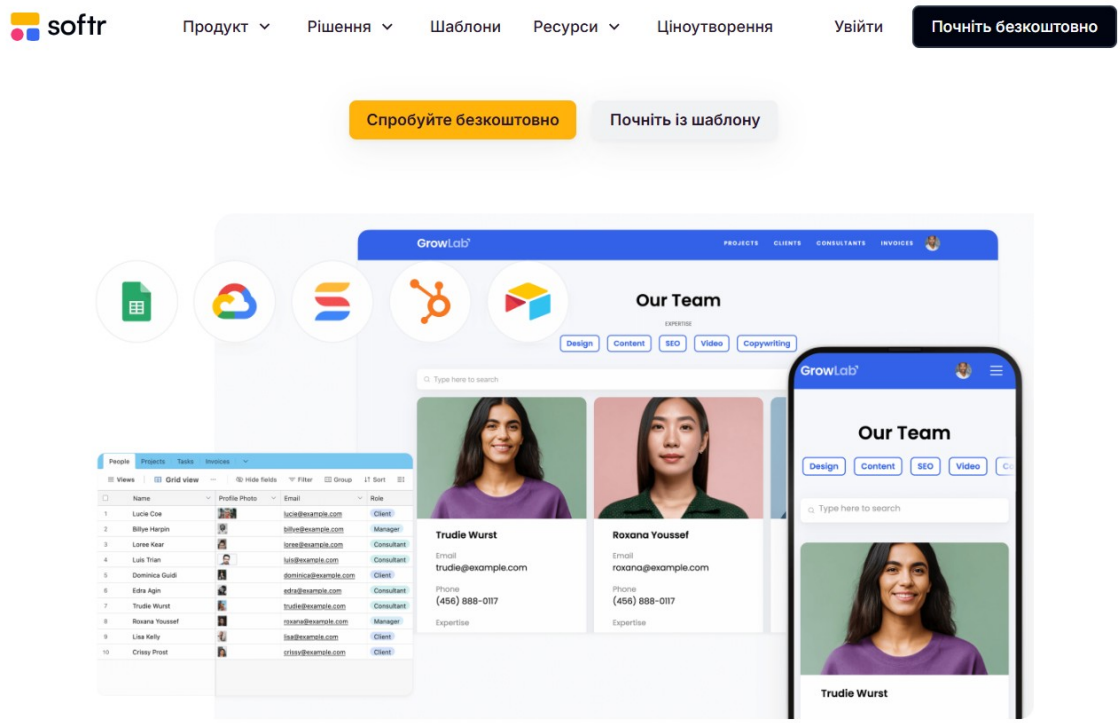



Рис.3.2 Thunkable

## 3.2 Дослідження особливостей системи, апаратних складових та процес їх підключення

Досліджуваний центр розумного дому дозволяє контролювати та керувати пристроями розумного дому, забезпечуючи безпеку. Нижче наведено деякі важливі функції проекту:

1. Може контролювати напругу, струм, потужність, енергію, частоту та коефіцієнт потужності, а також попереджати користувача про будь-які відхилення.

2. Може контролювати температуру, вологість та якість повітря всередині будинку.

3. Користувачі можуть дистанційно контролювати внутрішню частину будинку за допомогою підключеної камери через додаток для смартфона або веббраузер.

4. Користувачі можуть контролювати стан будь-якого приладу в будинку.

5. Користувачі можуть керувати будь-яким підключеним приладом дистанційно через додаток для смартфона або через веб-браузер.

Для реалізації проекту потрібні наступні апаратні компоненти:

- WIZnet - W5300-TOE-Shield;
- Seeed - Grove - Датчик якості повітря версії 1.3;
- Seeed - Набір Grove для початківців для Arduino - стара версія;
- Комплект серійної камери Seeed Grove;
- Seeed - Grove - 4-канальне реле SPDT;
- датчик температури та вологості Seeed - Grove DHT11;
- ST - Плата NUCLEO-F429ZI АБО F722ZE;
- Seeed - Захист SD-карти;
- модуль живлення PZEM004T.

Потрібне наступне програмне забезпечення:

- STM32CubeIDE;
- MQTT.fx;

- Пахо MQTT.

Підготовка плати STM32 Nucleo, представлено на рис.3.3.

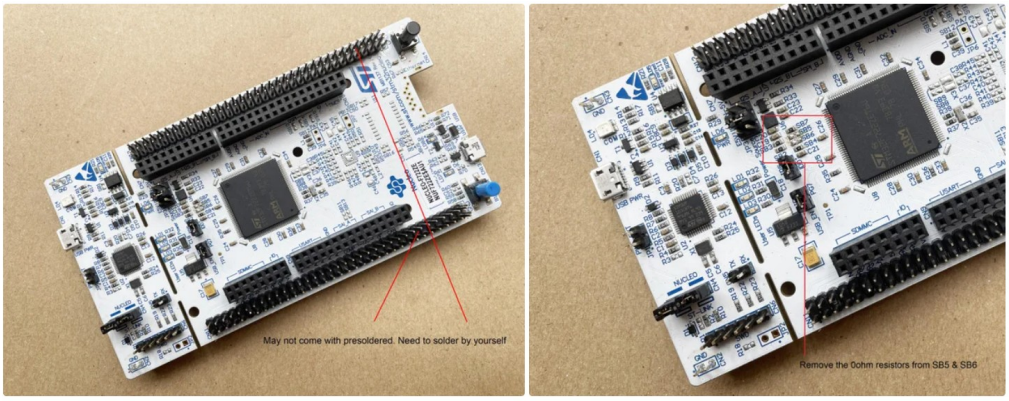



Рис.3.3 Крок 1 Підготовка плати STM32 Nucleo

Паяння контактних роз'ємів до плати STM32 Nucleo.

Плата STM32F722ZE Nucleo може не постачатися з попередньо припаяними чоловічими роз'ємами. У такому випадку потрібно припаяти подвійний чоловічий роз'єм до обох боків плати Nucleo. Ці роз'єми будуть використані для з'єднання W5300-TOE-SHIELD з платою Nucleo. В нашому випадку припаяно роз'єми з обох боків, як показано на наступному зображенні, рис.3.4.

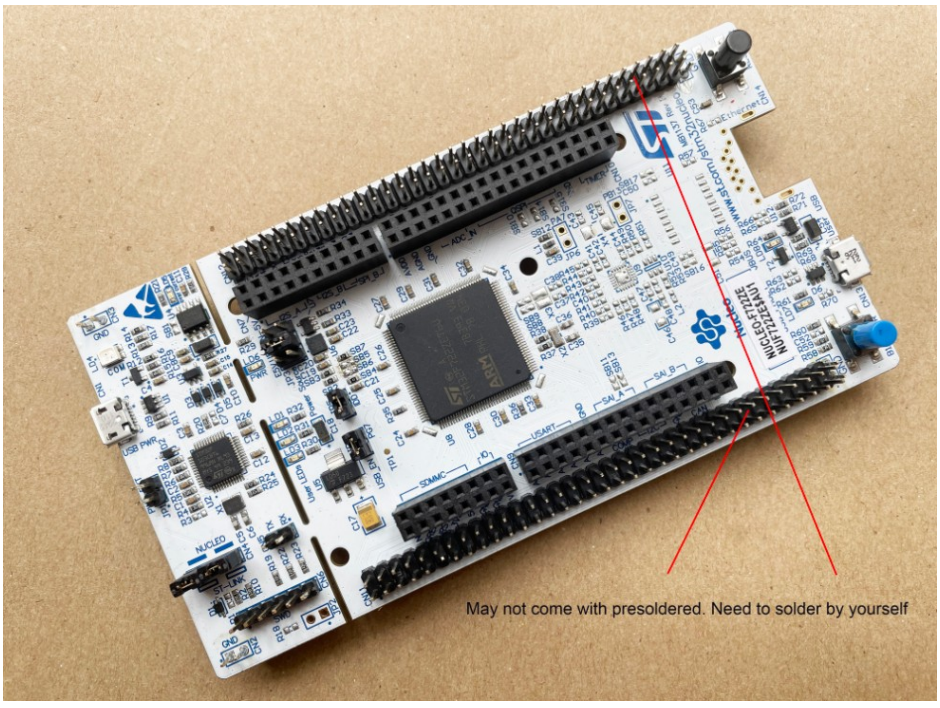


Рис.3.4 Приклад припаяних роз’ємів

При відсутності плати NUCLEO-F722ZE, то NUCLEO-F207ZG, NUCLEO-F429ZI, NUCLEO-F439ZI, NUCLEO-F756ZG та NUCLEO-F767ZI взаємозамінні і також повинні працювати.

Видалення резисторів SB5 та SB6 з верхньої частини плати STM32 Nucleo-144.

Виводи ST-LINK за замовчуванням – PD8 та PD9. Але ці виводи будуть використовуватися для виводу даних FMC (гнучкий контролер пам'яті) для керування W5300, вбудованим у щит W5300 TOE, та виводом ST-LINK плати STM32 Nucleo-144.

Отже, щоб використовувати ST-LINK плати STM32 Nucleo-144, використовуватимемо PC10 та PC11 замість PD8 та PD9. Отже, спочатку нам потрібно розімкнути PD8 та PD9 мікроконтролера STM32F722ZE для W5300 TOE Shield, видаливши резистори SB5 та SB6, як показано на наступному зображенні.

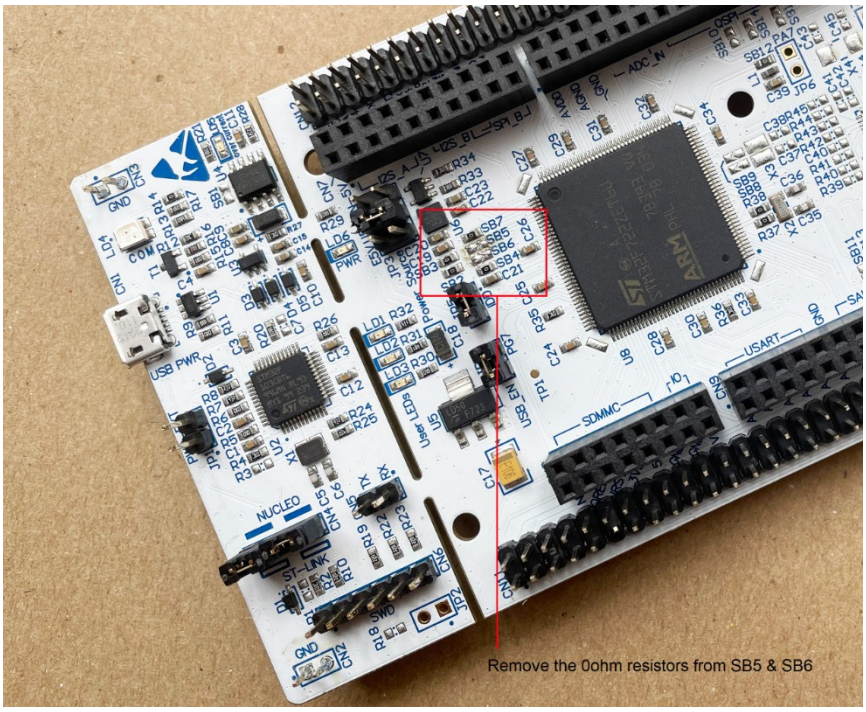



Рис.3.5 Крок 3: Підключення передавального та приймального пристроїв плати Nucleo до щита TOE W5300

Тепер потрібно з'єднати PC10 та PC11 щита W5300 TOE та CN5 TX, RX верхньої частини плати STM32 Nucleo-144 за допомогою перемикачів.

Шильд W5300 TOE: PC10 - STM32 Плата Nucleo-144: RX

Шильд W5300 TOE: PC11 - STM32 Плата Nucleo-144: TX

На ри.3.6 представлено захист TOE W5300 з платою STM32 Nucleo

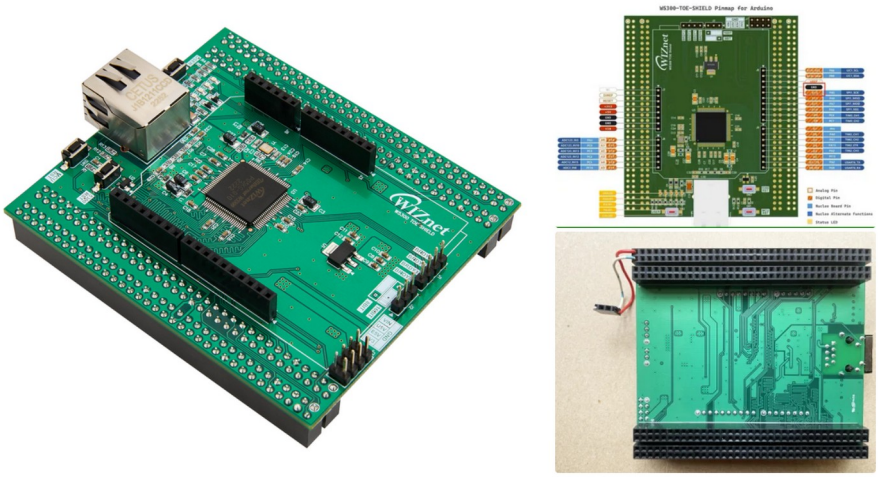


Рис. 3.6 Крок 2: Захист TOE W5300 з платою STM32 Nucleo

Наступним кроком потрібно підключити PC10 та PC11 щит W5300 TOE та CN5 TX, RX верхньої частини плати STM32 Nucleo-144, для чого використано перемичку.

На рис.3.7 показано з'єднання перемички з роз'ємом "мама".

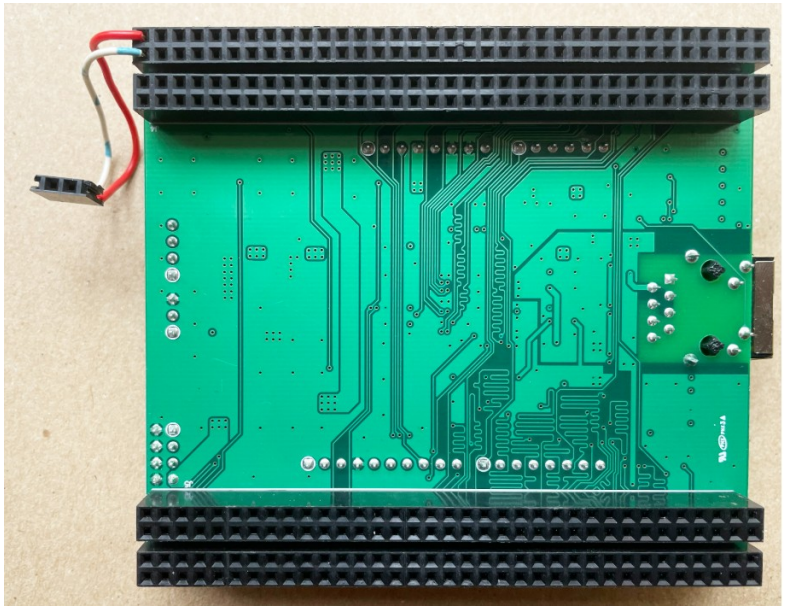


Рис. 3.7 З'єднання перемички

**Кріплення екрану TOE W5300 з платою STM32 Nucleo.**

На рис.3.8 показано прикріплену плату Nucleo та екран TOE.

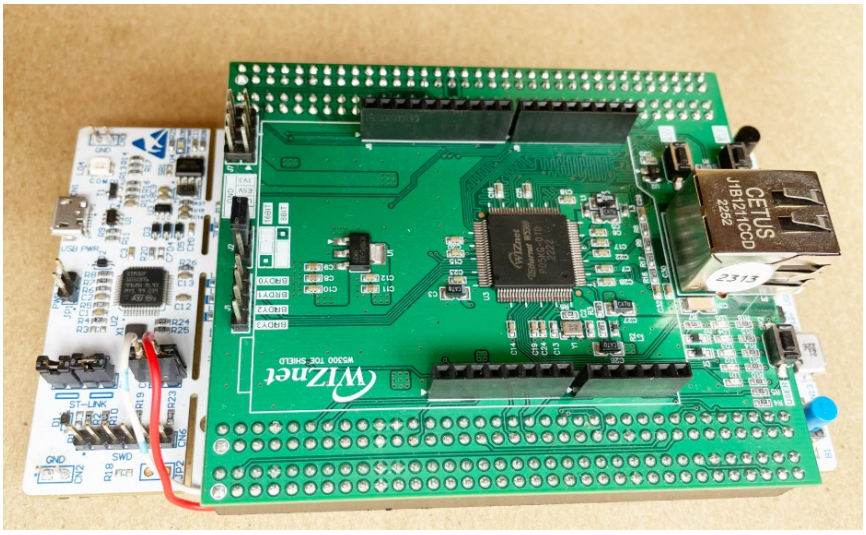



Рис. 3.8 Кріплення екрану TOE W5300 з платою STM32 Nucleo

Підключення датчиків Grove, представлено на рис.3.9.

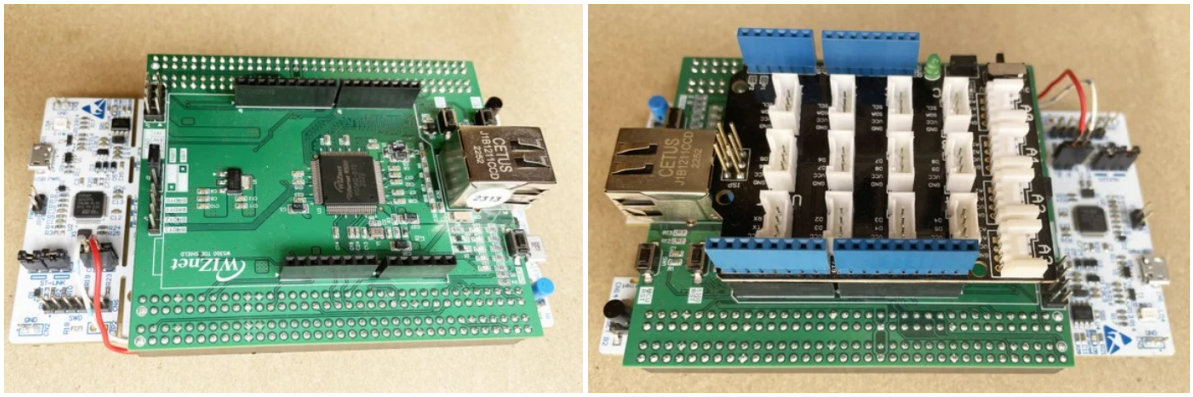


Рис.3.9 Крок 3: Підключення датчиків Grove

**Кріплення базового щитка Grove.**

Для підключення датчиків Grove до плати Nucleo використано базову плату Grove Arduino. Базова плату має кілька роз'ємів Grove, через які ми можемо легко підключати та використовувати будь-які датчики або виконавчі механізми Grove. На щастя, W5300 TOE SHIELD має сумісний з Arduino роз'єм, до якого ми можемо підключити будь-яку плату Arduino.

На рис.3.10 показано, як прикріплено базовий щиток Grove за допомогою захисного екрану для пальців W5300.

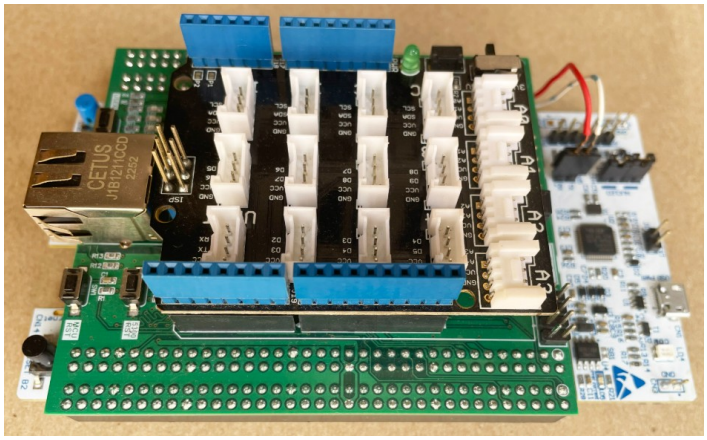


Рис. 3.10 Кріплення базового щитка Grove за допомогою захисного екрану для пальців W5300

**Підключення датчиків Grove.**

Підключення датчиків Grove до базового щита дуже просте. Я підключив датчик температури та вологості DHT-11 до порту D3, а датчик якості повітря – до

порту A0 базового щита. Ви можете використовувати різні порти, але вам потрібно відповідно налаштувати програму.

На рис.3.11 показано підключення датчиків.

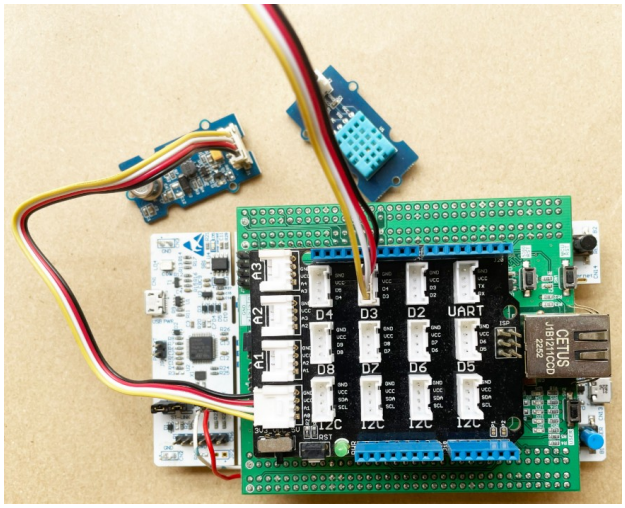



Рис.3.11 Підключення датчиків

Крок 4: Підключення модуля живлення PZEM-004T, проілюстровано на рис.3.12.

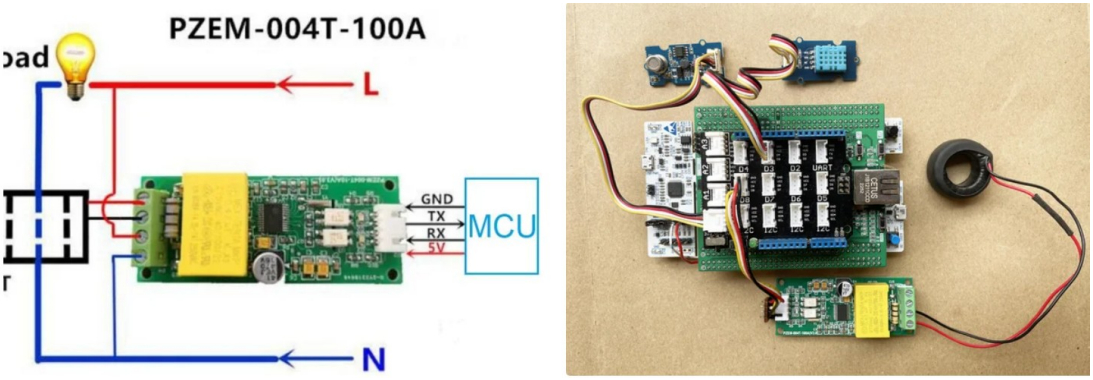



Рис.3.12 підключення модуля живлення

Модуль PZEM-004T використовується для вимірювання напруги, струму, потужності, енергії, коефіцієнта потужності, частоти та споживання енергії без будь-яких розрахунків. Він отримує показники напруги та струму від трансформаторів струму та трансформаторів потужності та виконує всі розрахунки за вас.

Підключення модуля дещо складне. Модуль вимірює струм і напругу від навантаження та передає розраховані дані через послідовний порт. Тому потрібно підключити модуль до мікроконтролера через порт UART, рис.3.13.

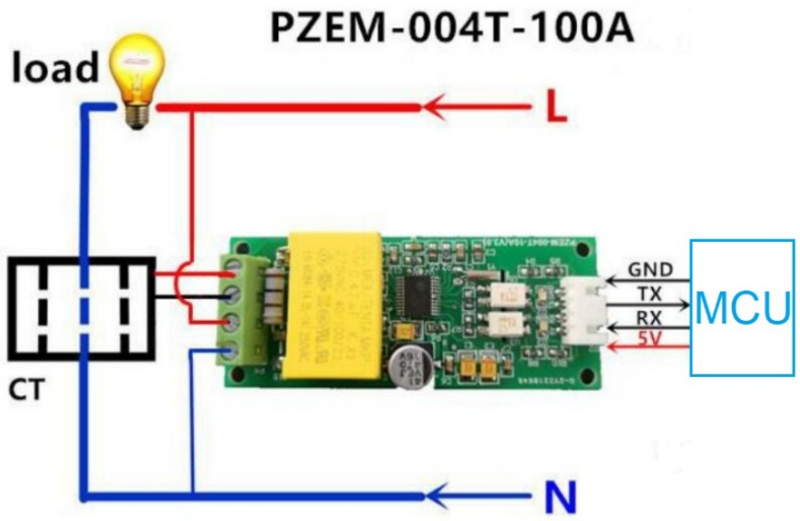



Рис.3.13 Схема підключення модуля

Сторона навантаження повинна бути підключена до навантаження через трансформатор струму для вимірювання струму. На зображенні вище показано з'єднання з навантаженням та мікроконтролером.

Вивід RX модуля живлення має бути підключений до виводу TX мікроконтролера, а вивід TX модуля живлення має бути підключений до виводу RX мікроконтролера. Виконано налаштування UART6 мікроконтролера STM32F722ZE для підключення модуля живлення PZEM. Вивід UART6 RX – це PC7, який є виводом D8 роз'єму Arduino, а вивід UART6 TX – це вивід PC6, який є D9 роз'єму Arduino. Використано порт D8 базової плати для підключення модуля PZEM.

На рис.3.14 показано з'єднання модуля PZEM з базовим екраном.

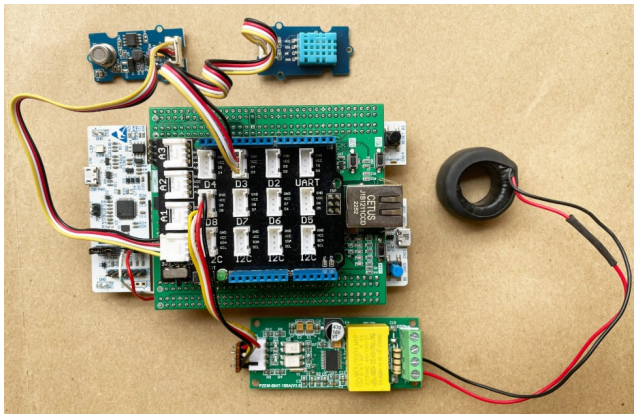


Рис.3.14 з'єднання модуля PZEM з базовим екраном

Крок 5. Підключення модуля реле, представлено на рис.3.15.

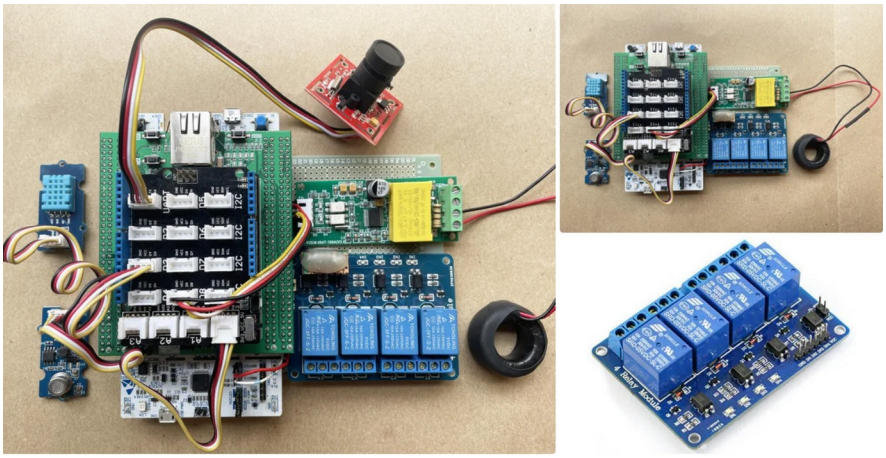


Рис.3.15 Підключення модуля реле

Для керування побутовою технікою в проекті використано 4-канальний релейний модуль. Кожне реле окремо керуватиме одним приладом. 4 релейні входи підключені до контактів PC0, PC1, PC2 та PC4 мікроконтролера STM32. Ці 4 контакти доступні для роз'єму J10 щита W5300 TOE SHIELD, рис.3.16.

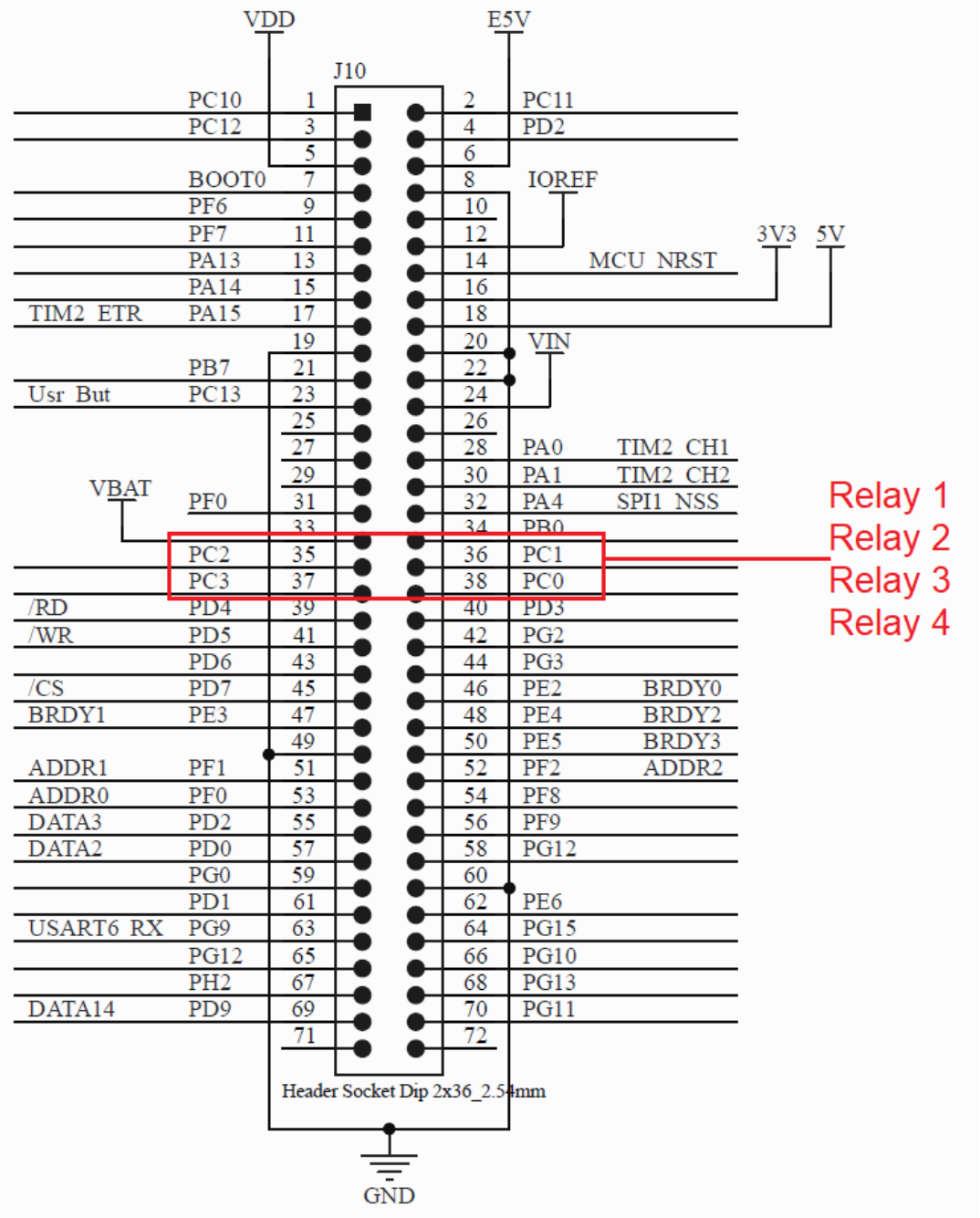



Рис.3.16 схема підключення

Після завершення з'єднання прикріплено усі компоненти до перфорованої плати, як показано на рис.3.17.

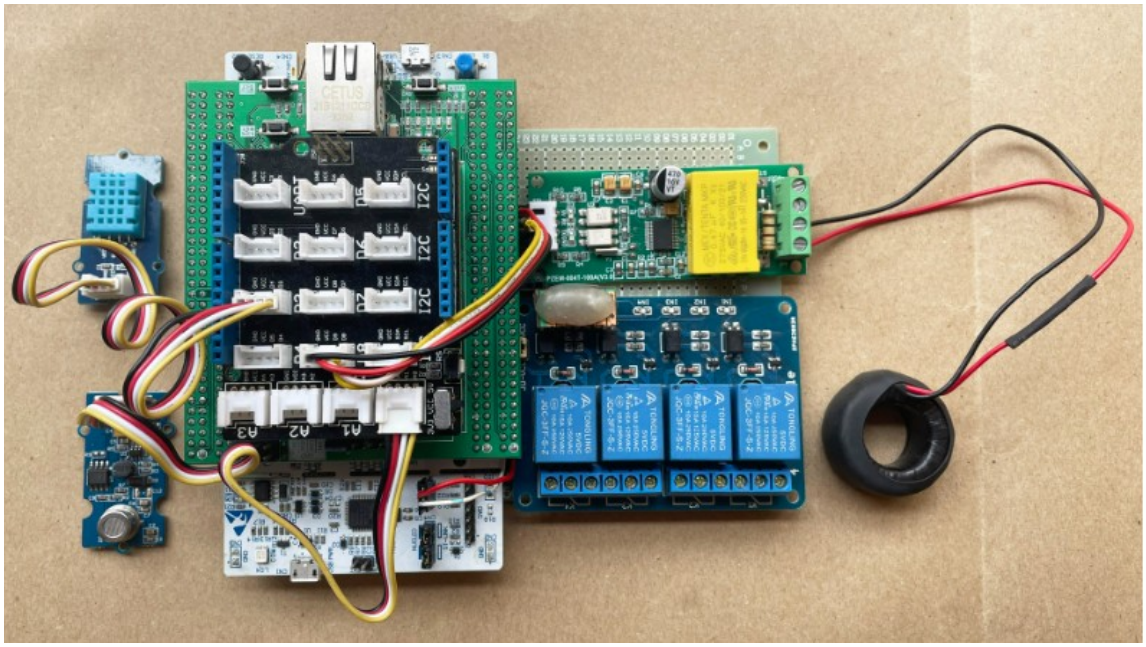



Рис.3.17 Прикріплення компонентів до перфорованої плати

**Підключення послідовної камери.**

Для дистанційного спостереження всередині кімнати виконано підключення серійної камери Grove, рис.3.18. Комплект серійної камери Grove включає одну плату керування та два змінні об'єктиви: один стандартний, а інший ширококутний.

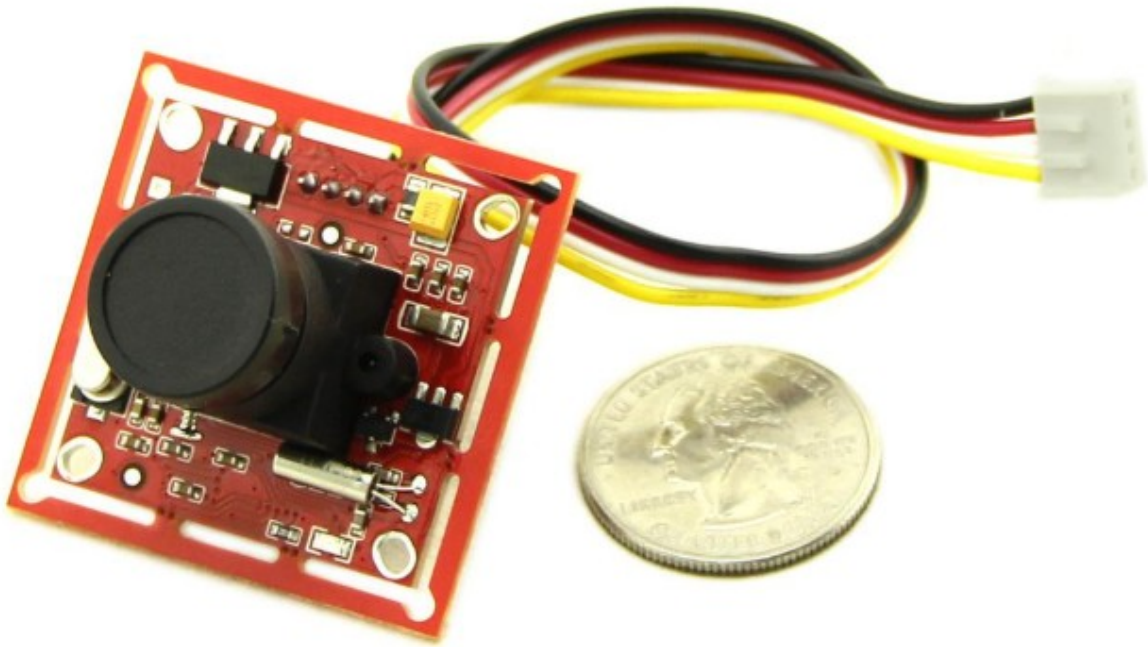


Рис. 3.18 Підключення послідовної камери

Камера зв'язується з будь-яким мікроконтролером через послідовний порт. Підтримуються як RS485, так і RS232. Для підключення камери використано UART7 плати STM32 Nucleo. UART7 налаштовано на контактах PF6 та PF7 мікроконтролера. Ці два контакти доступні на роз'ємі J10 щита W5300 TOE SHIELD.

На рис.3.19 показано підключення камери до порту UART базового щита.

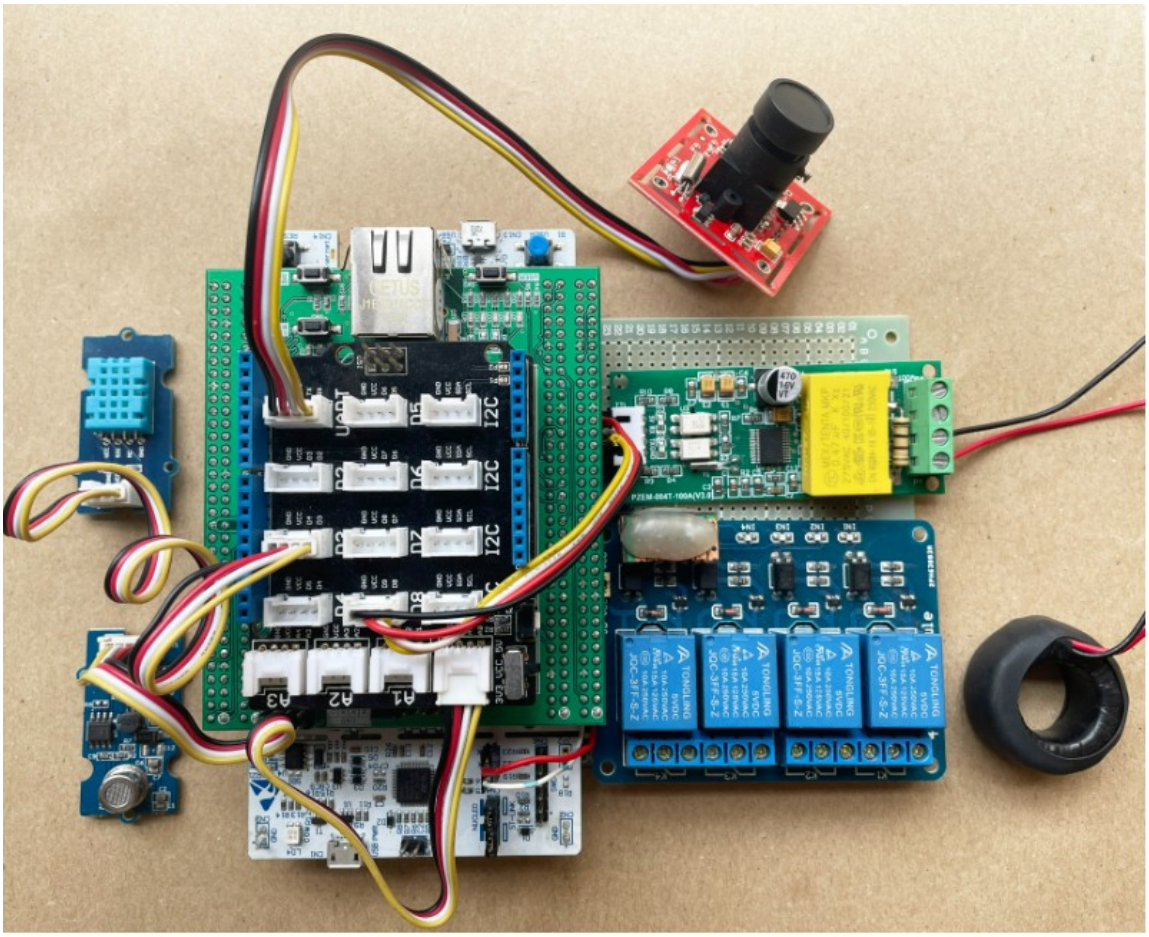


Рис.3.19 підключення камери до порту UART базового щита

### 3.3 Огляд схеми проекту

Повна схема апаратного забезпечення виглядає наступним чином, рис.3.20.

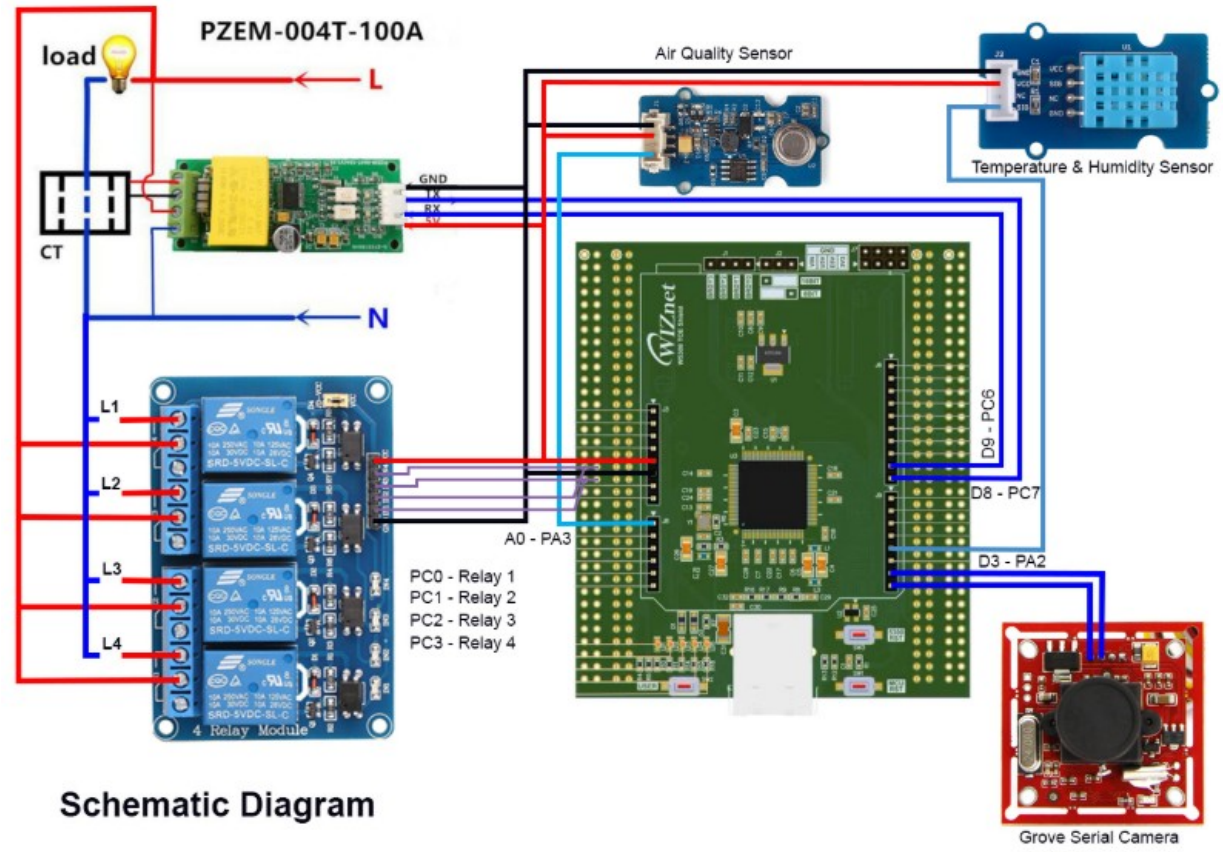



Рис. 3.20 Повна схема апаратного забезпечення

Крок 6: Розробка прошивки, рис.3.21.

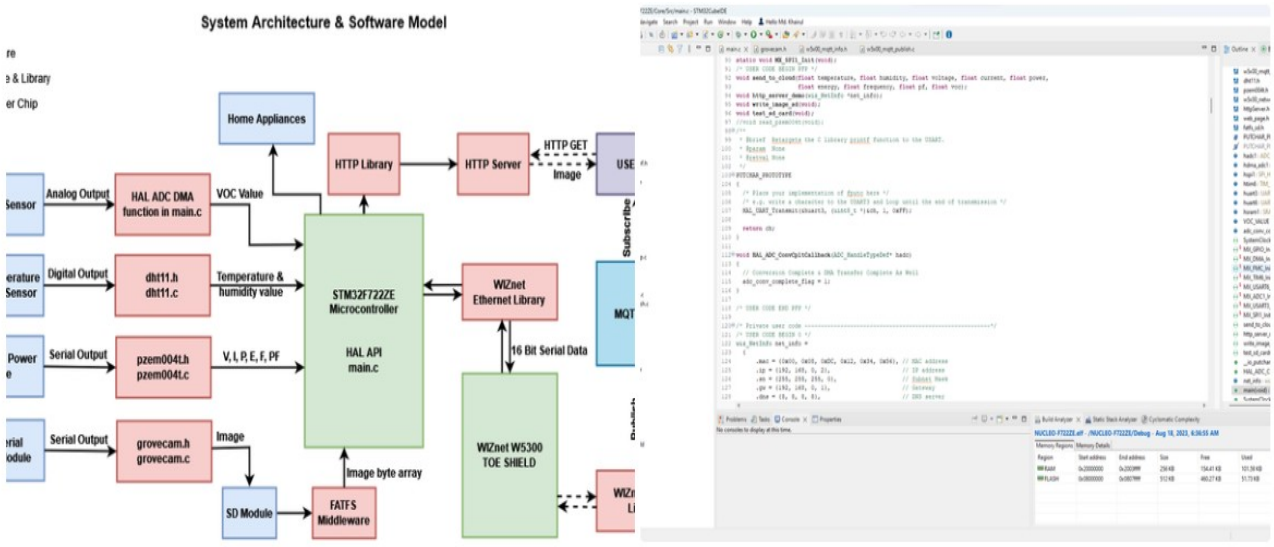



Рис.3.21 Архітектура системи та модель програмного забезпечення

Перш ніж перейти до кодування, слід проаналізувати, як працює система. Мозком системи є мікроконтролер STM32H7. Усі датчики, щит Ethernet TOE та камера безпосередньо підключені до мікроконтролера STM32. Датчики передають дані мікроконтролеру STM32, який використовує модуль Ethernet W5300 для пересилання даних на хмарний сервер за протоколом MQTT. Було створено додаток для Android, за допомогою якого дані датчиків можна візуалізувати дистанційно. Приладами, підключеними до мікроконтролера STM32, також можна керувати з додатків. Оскільки MQTT не підходить для передачі зображень, я реалізував HTTP-сервер для надсилання даних зображень з пристрою користувачеві. Таким чином, користувачі зможуть дистанційно контролювати стан будинку або рослин з додатка. Для розробки та розуміння програми прошивки необхідні базові знання MQTT.

MQTT став найпопулярнішим протоколом обміну повідомленнями в застосунках Інтернету речей для зв'язку між пристроями та хмарою, а також між пристроями. Він широко застосовується в більшості систем домашньої автоматизації. Сьогодні майже всі хмарні сервіси підтримують MQTT.

Ми використовуємо техніку зв'язку "клієнт-сервер" для обслуговування інтернет-контенту, де браузер виступає в ролі клієнта, а контент знаходиться на сервері. На відміну від клієнт-сервер, MQTT — це техніка зв'язку "клієнт-брокер".

У MQTT клієнти (точніше, пристрої) не надсилають повідомлення безпосередньо один одному, а спілкуються через брокера MQTT. Пристрій, який надсилає дані, називається видавцем, а пристрій, що приймає, — підписником. Якщо два пристрої хочуть спілкуватися один з одним, вони підключаються до спільного брокера через спільний канал, який називається темою. Слово "тема" позначає буквено-цифровий рядок, який брокер використовує для фільтрації повідомлень для кожного підключеного клієнта. Тема складається з одного або кількох рівнів тем. Кожен рівень тем розділяється скісну рискою (роздільником рівнів тем). Наприклад, "myhome/kitchen/temp" — це дійсна тема MQTT.

Повідомлення публікуються пристроями, використовуючи тему. Коли пристрій підписується на певну тему, цей пристрій отримує повідомлення миттєво,

якщо інші пристрої публікують повідомлення в цій темі. Будь-який пристрій може публікувати повідомлення в одній або кількох темах і водночас підписуватися на одну або кілька тем. Отже, це двонаправлений протокол зв'язку між кількома пристроями. Брокер MQTT піклується про безпеку, підключення, автентифікацію, доставку повідомлень та зберігання повідомлень.

У наведеному вище аналізі пояснювалися основи MQTT, але можливо запитати, як насправді використовуємо його в пристрої. Кожен брокер MQTT має адресу (наприклад, test.mosquitto.org) та номер порту (наприклад, 1883). Ми використовуємо адресу та номер порту брокера, щоб встановити їх на пристрої Інтернету речей для підключення до цього конкретного брокера. Для безпечного з'єднання вам також може знадобитися використовувати ім'я користувача та пароль. Для публікації повідомлення ви потім створюєте та використовуєте тему в програмі. Пристрій, який хоче отримати це повідомлення, повинен підписатися на цю конкретну тему.

**Передача зображення.**

Оскільки MQTT — це легкий протокол, він не є найкращим вибором для публікації зображень. Тому було реалізовано HTTP-сервер для віддаленого показу зображень будинку користувачеві. HTTP — це метод зв'язку клієнт-сервер, за якого додаток Android надсилає запит GET на HTTP-сервер для отримання зображення після натискання кнопки. Сервер повертає зображення клієнту.

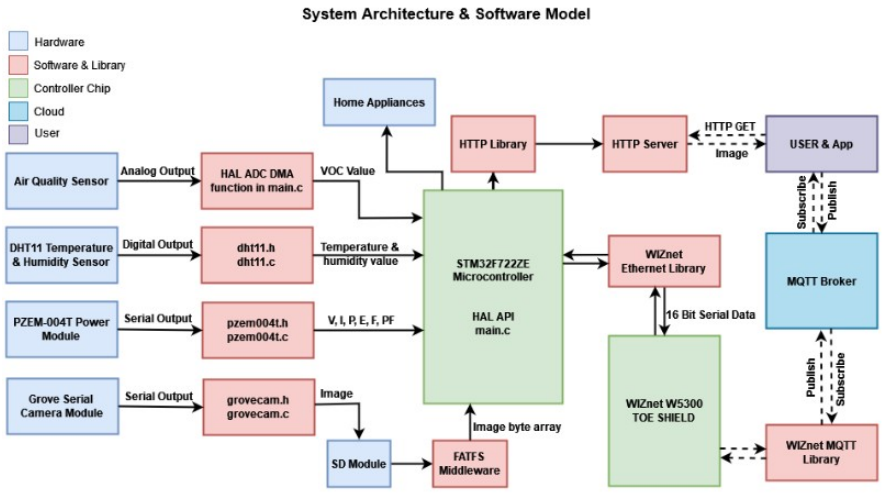


Рис.3.22 Архітектура системи

**Модель програмного забезпечення.**

З наведеного вище зображенні показано відповідний вихідний файл та бібліотеку окремо для кожного обладнання для кращого розуміння. Виконана спроба зробити вихідний файл конкретного датчика незалежним від інших датчиків чи обладнання, щоб була можливість повторно використовувати вихідні файли для свого іншого проекту.

Наприклад, dht11.h та dht11.c пов'язані виключно зі зчитуванням значення температури та вологості з датчика DHT11. Ці два вихідні файли повністю незалежні від інших джерел. Ви можете безпосередньо використовувати ці два вихідні файли для будь-якого з ваших проектів STM32 для інтерфейсу датчика DHT11. Те саме стосується PZEM-004T та модуля послідовної камери Grove.

Для зберігання зображень, знятих з камери, потрібна SD-карта. Для інтерфейсу SD я використовую проміжне програмне забезпечення FATFS. Для забезпечення підключення до Інтернету в проекті використовується Wiznet W5300 TOE Shield. Цей модуль вимагає зв'язку з мікроконтролером, і для цієї мети була використана бібліотека Ethernet, надана WIZnet. Для зв'язку MQTT я модифікував і використав бібліотеку MQTT, надану WIZnet. Те саме зроблено і для реалізації HTTP-сервера.

Крок 7: Створення проекту в STM32CubeIDE, рис.3.23.

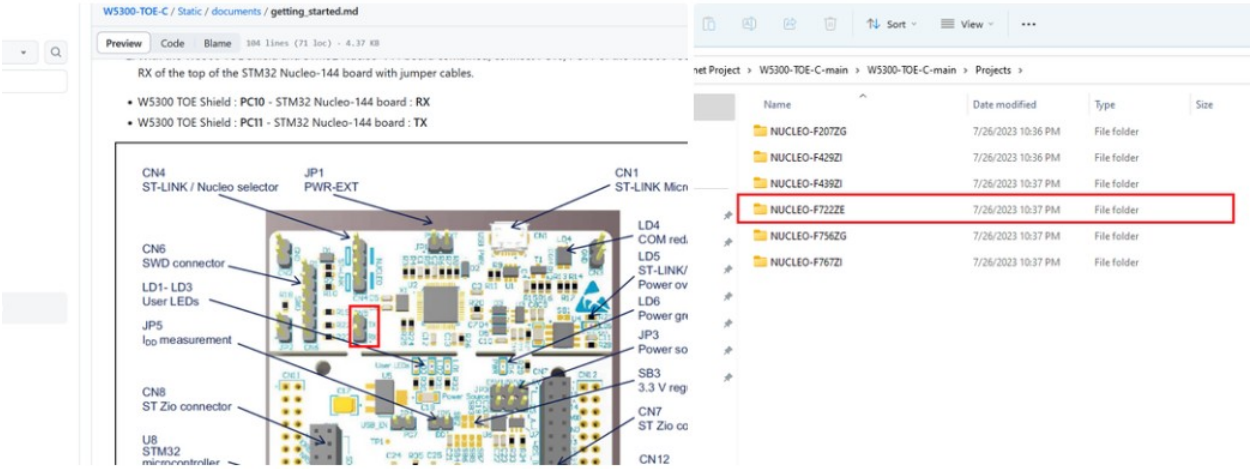



Рис. 3.23 Створення проекту в STM32CubeIDE

Тепер давайте покажемо, як я насправді розробляв прошивку. Для розробки прошивки я обрав STM32CubeIDE. І я почав з коду, наданого WIZnet за посиланням на GitHub: https://github.com/Wiznet/W5300-TOE-C/

**Крок 1: Завантаження та встановлення STM32CubeIDE**

Виконуємо завантаження STM32CubeIDE за посиланням: https://www.st.com/en/development-tools/stm32cubeide.html та встановив його на свій ПК з Windows.

**Крок 2: Завантаження необхідної бібліотеки та зразка коду**

Завантажено репозиторій GitHub, наданий WIZnet, за посиланням: https://github.com/Wiznet/W5300-TOE-C/ . Цей репозиторій містить усі необхідні бібліотеки для W5300 TOE SHIELD, технічний опис, схему, посібник із початку роботи та приклад проекту. На наступному зображенні показано скріншот посібника із початку роботи GitHub, рис.3.24.

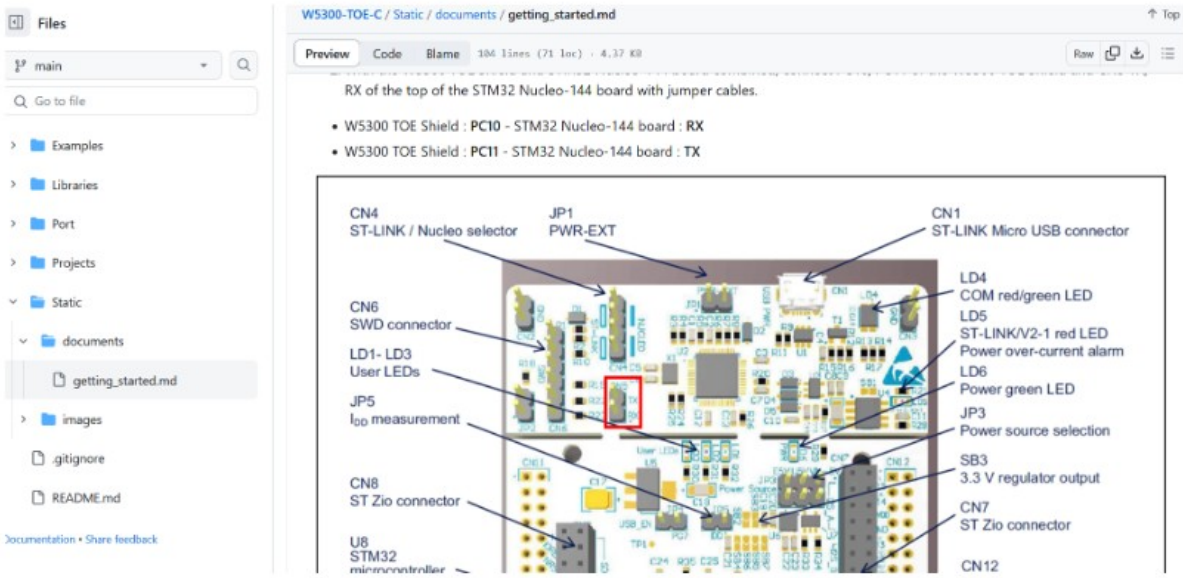



Рис.3.24 Посібник із початку роботи GitHub

Крок 3: Створення першого проєкту

Реалізація проетку розпочато  з відкриття прикладу проєкту з GitHub для досліджуваної конкретної плати. Виберіть правильний проєкт на основі вашої плати STM32 Nucleo, рис.3.25.

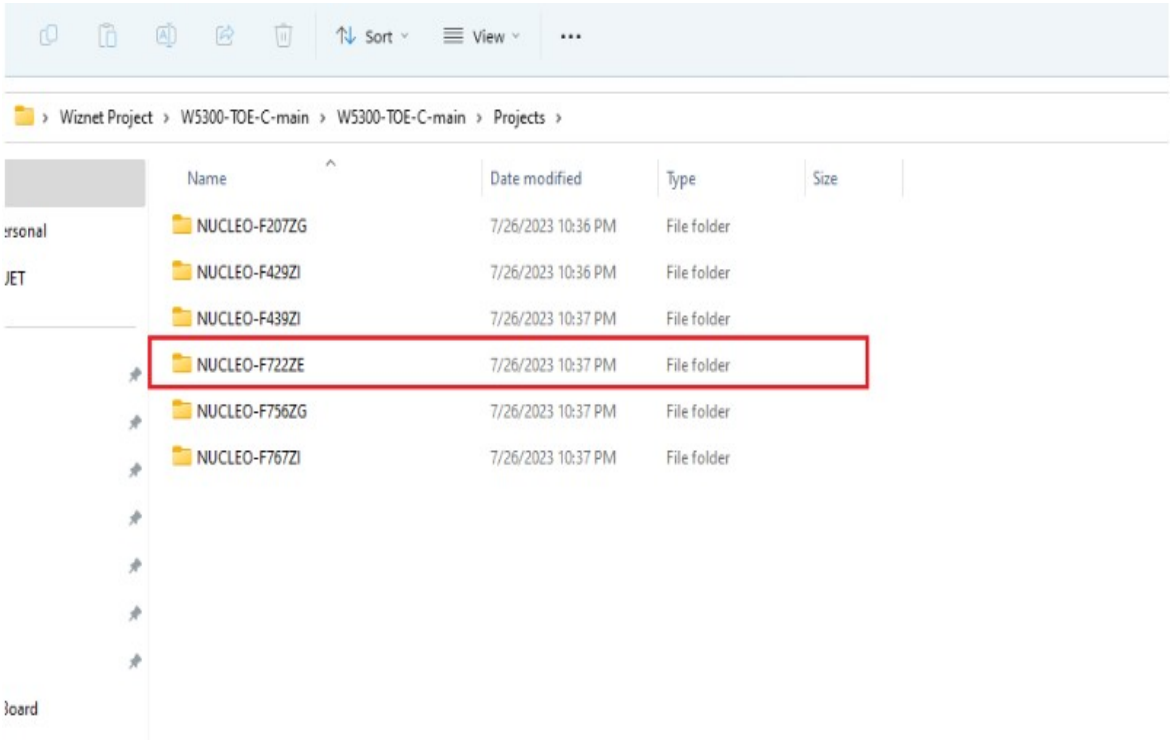



Рис.3.25 Відкриття прикладу проєкту з GitHub

Крок 4: Створення проєкту, рис.3.26.

Після імпорту та відкриття проєкту варто спочатку зібрати його, перш ніж починати будь-які зміни, щоб переконатися, що все працює.

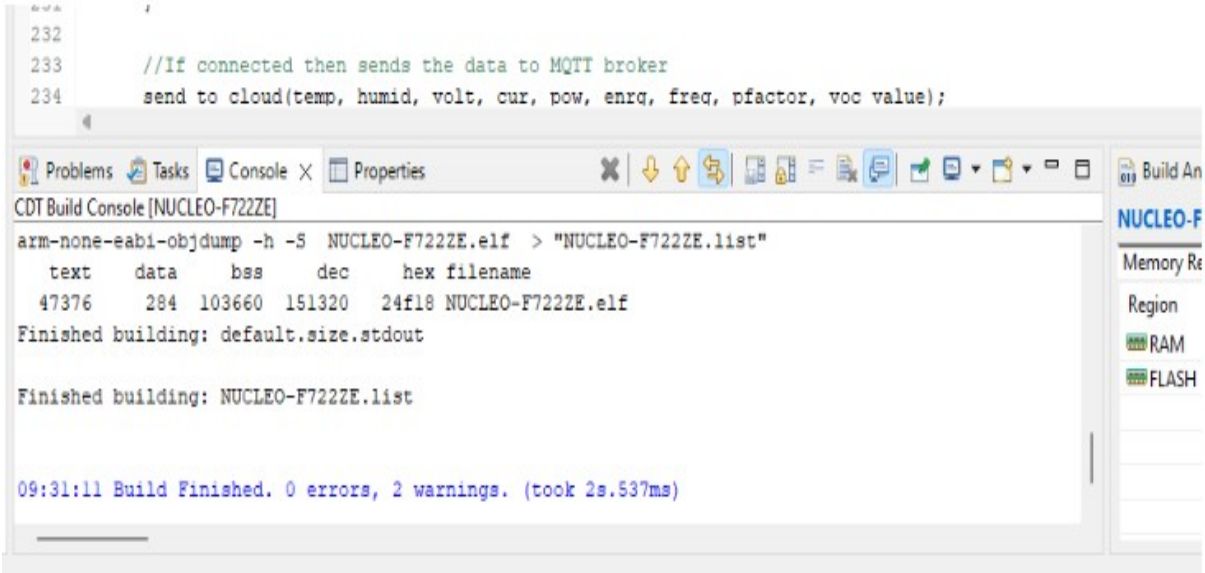


Рис.3.26 Процес створення проекту

Крок 8: Тестування коду

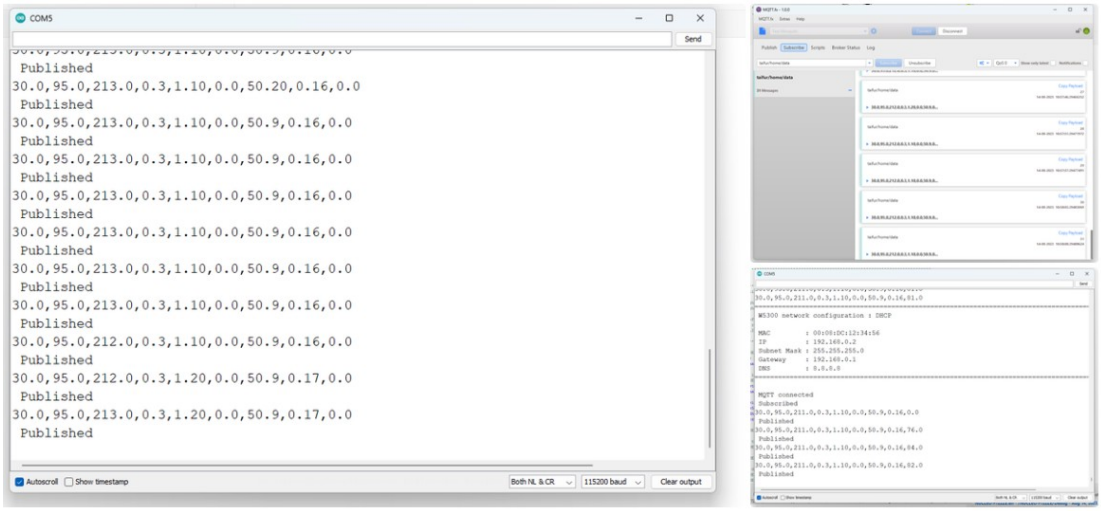



Рис. 3.27 Тесування

Частково вихідний код представлено на рис.3.28.

```
<?xml version="1.0" encoding="UTF-8" standalone="no"?>
<project>
    <configuration id="com.st.stm32cube.ide.mcu.gnu.managedbuild.config.exe.debug.1323956273" name="Debug">
        <extension point="org.eclipse.cdt.core.LanguageSettingsProvider">
            <provider copy-of="extension" id="org.eclipse.cdt.ui.UserLanguageSettingsProvider"/>
            <provider-reference id="org.eclipse.cdt.core.ReferencedProjectsLanguageSettingsProvider" ref="shared-provider"/>
            <provider-reference id="org.eclipse.cdt.managedbuilder.core.MBSLanguageSettingsProvider" ref="shared-provider"/>
            <provider class="com.st.stm32cube.ide.mcu.toolchain.armnone.setup.CrossBuiltinSpecsDetector" console="false" env-hash="1830130695403224493"
id="com.st.stm32cube.ide.mcu.toolchain.armnone.setup.CrossBuiltinSpecsDetector" keep-relative-paths="false" name="MCU ARM GCC Built-in Compiler Settings" parameter="${COMMAND}
${FLAGS} -E -P -v -dD &amp;quot;${INPUTS}&amp;quot;" prefer-non-shared="true">
                <language-scope id="org.eclipse.cdt.core.gcc"/>
                <language-scope id="org.eclipse.cdt.core.g++"/>
            </provider>
        </extension>
    </configuration>
    <configuration id="com.st.stm32cube.ide.mcu.gnu.managedbuild.config.exe.release.1709223351" name="Release">
        <extension point="org.eclipse.cdt.core.LanguageSettingsProvider">
            <provider copy-of="extension" id="org.eclipse.cdt.ui.UserLanguageSettingsProvider"/>
            <provider-reference id="org.eclipse.cdt.core.ReferencedProjectsLanguageSettingsProvider" ref="shared-provider"/>
            <provider-reference id="org.eclipse.cdt.managedbuilder.core.MBSLanguageSettingsProvider" ref="shared-provider"/>
            <provider class="com.st.stm32cube.ide.mcu.toolchain.armnone.setup.CrossBuiltinSpecsDetector" console="false" env-hash="1830130695403224493"
id="com.st.stm32cube.ide.mcu.toolchain.armnone.setup.CrossBuiltinSpecsDetector" keep-relative-paths="false" name="MCU ARM GCC Built-in Compiler Settings" parameter="${COMMAND}
${FLAGS} -E -P -v -dD &amp;quot;${INPUTS}&amp;quot;" prefer-non-shared="true">
                <language-scope id="org.eclipse.cdt.core.gcc"/>
                <language-scope id="org.eclipse.cdt.core.g++"/>
            </provider>
        </extension>
    </configuration>
</project>
```

Рис.3.28 Вихідний код

Є можливість безпосередньо завантажити репозиторій та відкрити його за допомогою STM32CubeIDE. Після відкриття можливо зібрати проект та запустити його на платі STM32F722ZE Nucleo.

Далі є можливість перевірити відповідь у послідовному терміналі після підключення всіх датчиків. Після успішного підключення до Inetrnet та сервера MQTT отримано наступну відповідь у послідовному терміналі. Було використано послідовний термінал Arduino. Моливо використовувати будь-який послідовний термінал, який подобається.

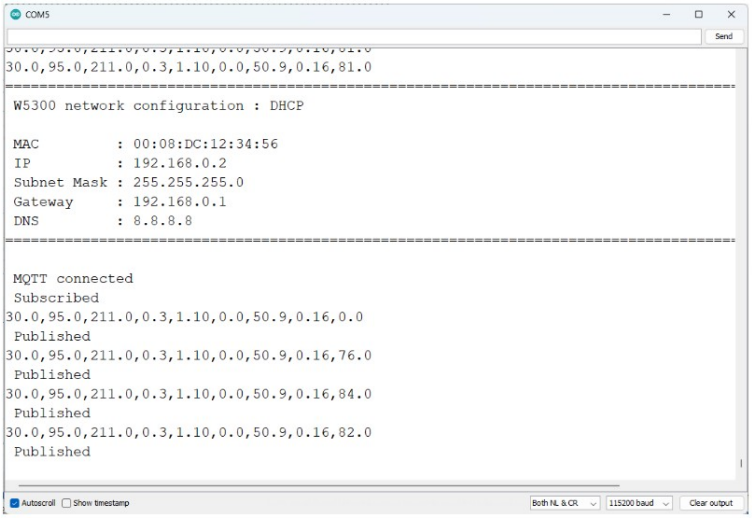



Рис.3.29 Перевірка відповідь у послідовному терміналі

Для перевірки успішної публікації та отримання повідомлення MQTT можна скористатися інструментом MQTT.fx. Ось відповідь, яку я отримав.

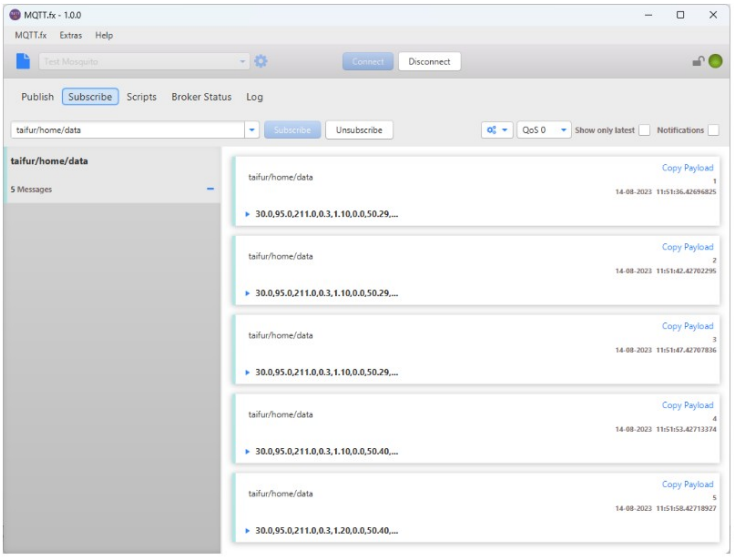



Рис. 3.30 Застосування інструменту MQTT.fx

### 3.4 Розробка додатку для Android

Наступним кроком , який є вже кроком 9, є розробка додатку для Android із застосуванням середовища MIT App Inventor, яке було досліджено у підрозділі 3.1.

Даний додаток передбачає віддалений моніторинг та керування будинком.

Виконання програмування MIT App Inventor виконується із застосуванням блоків.

На наступному зображенні показано етап розробки програми.

Створення програми в MIT App Inventor починається з присвоєння назви новому проєкту. Після цього переходять до формування інтерфейсу застосунку, рис.3.31.

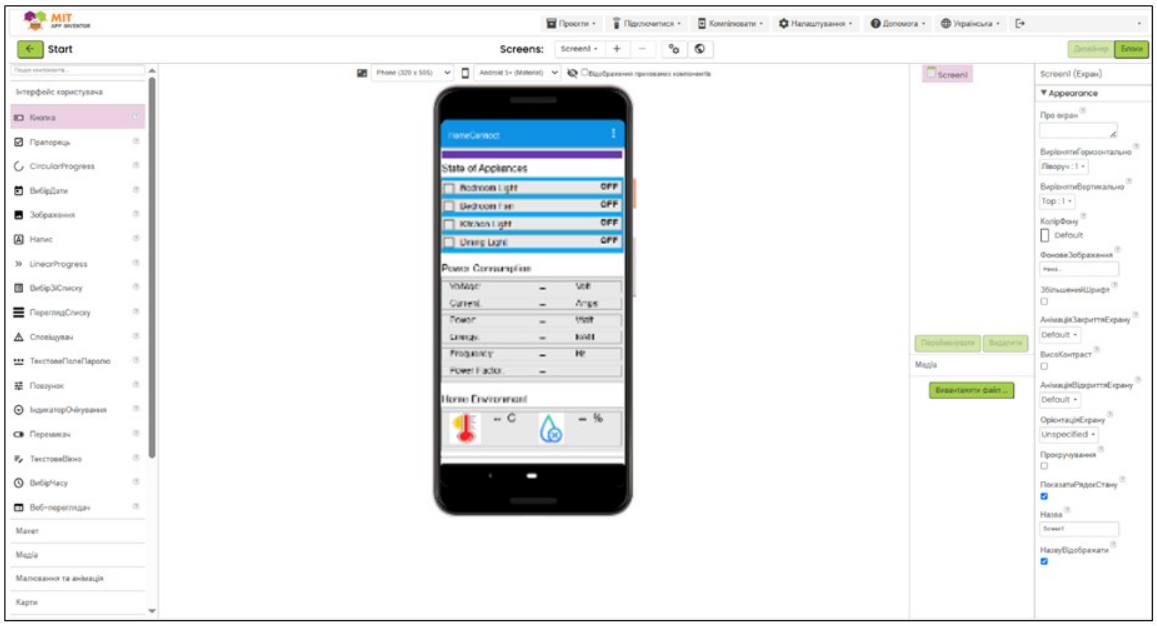



Рис.3.31 Етап розробки програми

Процес створення застосунку в MIT App Inventor умовно поділяють на два основні кроки: формування інтерфейсу та розроблення програмної логіки.

Модель смартфона, який зображує елементи керування також представлені на рис.3.31.

Після створення інтерфейсу наступним етапом є зіб програми для мобільної додатку. Повний блок проекту наведено на рис.3.32.




Рис.3.32 Повний блок розробки програмної логіки

Щоб запустити створений додаток на телефоні, на комп’ютері потрібно натиснути кнопку, яка відкриває вікно з QR-кодом. Далі на смартфоні, де встановлено застосунок MIT App Companion, слід відкрити його так само, як і будь-яку іншу програму. У меню Companion оберіть пункт «Сканувати QR-код» і наведіть камеру на код, що відображається в App Inventor. Якщо сканування недоступне, код можна ввести вручну, рис. 3.33.

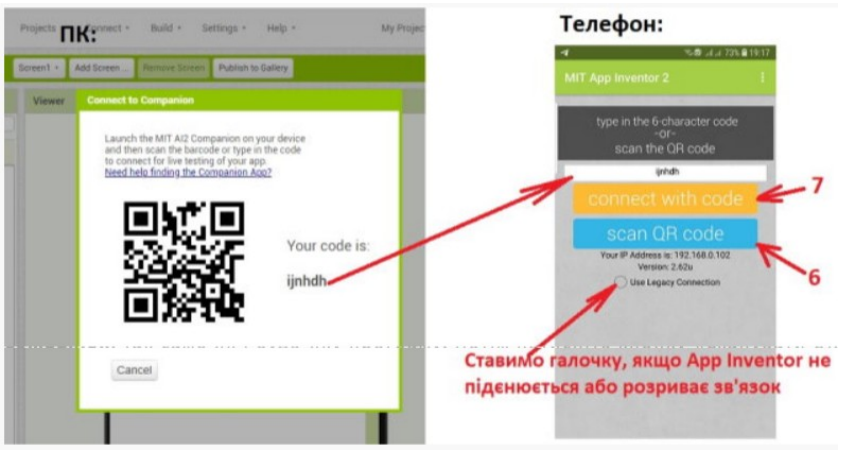



Рис.3.23 Приклад підключення додатку на смартфон

На рис.3.34 представлено скріншот програм

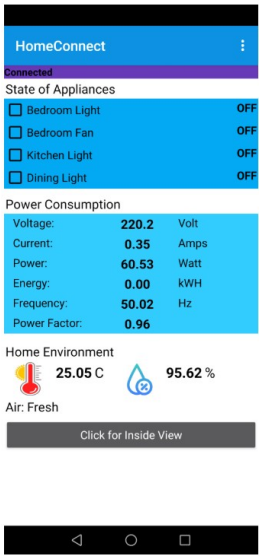



Рис.3.34 Інтерфейс програми контролю

# ВИСНОВКИ

У першому розділі було досліджено ключові чинники, що визначають сучасний розвиток ринку систем «розумний будинок». Аналіз поведінкових тенденцій споживачів підтвердив зростаючий інтерес до технологій домашньої автоматизації, зумовлений прагненням підвищити комфорт, енергоефективність та безпеку житла. Вивчення глобального ринку дало змогу окреслити динаміку його розширення, визначити основні сегменти та фактори, що впливають на формування попиту.

Регіональний аналіз засвідчив нерівномірність розвитку ринку, яка пов’язана з різницею рівнів цифровізації, економічних можливостей та технологічної інфраструктури. У процесі дослідження було виділено провідних гравців галузі, що формують її стратегічний напрямок і впливають на впровадження інновацій. Окрему увагу приділено перевагам автоматизованих систем, які забезпечують нові функціональні можливості житла та сприяють оптимізації витрат енергії.

Глобальна статистика підтверджує сталий приріст ринку й високий потенціал його подальшого розвитку. Технології «розумного дому» демонструють тенденцію до широкого впровадження, що робить тему дослідження актуальною й значущою для подальшого наукового та практичного опрацювання.

У другому розділі було здійснено комплексне дослідження технічних основ, необхідних для реалізації систем домашньої автоматизації на базі сучасних мікропроцесорних платформ. Аналіз сімейства процесорів ARM дав змогу визначити їх ключові архітектурні переваги, зокрема високу енергоефективність, масштабованість та широкі можливості інтеграції в пристрої Інтернету речей. Детальне вивчення лінійки Cortex-M підтвердило її придатність для побудови вбудованих систем завдяки оптимізованому набору інструкцій, низькому енергоспоживанню та підтримці широкого спектра периферійних модулів.

Особливу увагу було приділено мікроконтролеру STM32 Cortex-M4, який поєднує високі обчислювальні характеристики з розвиненими комунікаційними можливостями, що робить його ефективною основою для створення

інтелектуальних систем керування. Аналіз застосування мікроконтролерів Cortex-M у сфері IoT довів їхню важливу роль у формуванні сучасних рішень автоматизації, орієнтованих на комплексну взаємодію пристроїв у мережі.

У розділі також розглянуто основні протоколи домашньої автоматизації, що визначають способи обміну даними між пристроями розумного простору. Їх порівняння дозволило визначити найбільш поширені та технологічно перспективні стандарти, які забезпечують стабільність, масштабованість та сумісність елементів системи.

У практичній частині було здійснено реалізацію домашнього центру керування на базі мікроконтролера STM32, що дозволило перевірити на практиці обґрунтовані в попередніх розділах технічні рішення. Проведений аналіз і вибір середовища розробки забезпечив можливість ефективного створення програмних модулів для управління системою, а також адаптацію інструментів розробки до специфіки мікроконтролерної платформи.

Дослідження апаратної частини та процесів підключення складових дало змогу визначити оптимальну конфігурацію датчиків, виконавчих елементів та комунікаційних модулів, необхідних для реалізації функціоналу «розумного дому». Огляд схемотехнічних рішень підтвердив коректність організації взаємодії між компонентами системи та забезпечив цілісне розуміння її архітектури.

Розроблення Android-додатку стало завершальним етапом практичної частини, надавши зручний інтерфейс для дистанційного керування домашньою автоматикою. Це забезпечило інтеграцію апаратної платформи з мобільним середовищем та продемонструвало ефективність застосування STM32 у поєднанні з сучасними програмними технологіями.

Загалом виконана робота підтвердила можливість створення функціонального та масштабованого центру керування «розумним домом», що може бути використаний як база для подальшого вдосконалення та розширення системи.

# ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ


1. Fântâna, G.I.; Oae, S.A. Evolution of Smart Buildings. Int. J. Energy 2021, pp. 41–43.

2. Alanne, K.; Sierla, S. An overview of machine learning applications for smart buildings. Sustain. Cities Soc. 2022.

3. Dai, X.; Liu, J.; Zhang, X. A review of studies applying machine learning models to predict occupancy and window-opening behaviours in smart buildings. Energy Build. 2020.

4. Pramanik, P.K.D.; Mukherjee, B.; Pal, S.; Pal, T.; Singh, S.P. Green Smart Building: Requisites, Architecture, Challenges and Use Cases; IGI Global: Hershey, PA, USA, 2020.

5. GhaffarianHoseini, A.; GhaffarianHoseini, A.; Tookey, J.; Omrani, H.; Fleury, A.; Naismith, N.; GhaffarianHoseini, M. The Essence of Smart Homes: Application of Intelligent Technologies towards Smarter Urban Future; IGI Global: Hershey, PA, USA, 2016.

6. Ye, J.; Hassan, M.T.; Carter, D.C.; Zarli, A. ICT for Energy Efficiency: The Case for Smart Buildings. In Managing IT in Construction/Managing Construction for Tomorrow; Dikbas, A., Ergen, E., Giritli, H., Eds.; CRC Press: Boca Raton, FL, USA, 2020.

7. Mejjaouli, S.; Alzahrani, M. Decision-making model for optimum energy retrofitting strategies in residential buildings. Sustain. Prod. Consum. 2020, pp. 211–218

8. Sgrò, G. Smart Buildings: ICT as a Driving Energy-Efficient Solution for Retrofitting of Existing Buildings. Master’s Thesis, KTH School of Industrial Engineering and Management Energy Technology, Sweden, Stockholm, 2018.

9. Alasdair, A. Bluetooth LE Projects with Arduino, Raspberry Pi, and Smartphones/ A. Alasdair. − M.: Make Community LLC, 2018, 256c.

10. Schwartz, M. Internet of Things with Arduino Cookbook /M. Schwartz. − M. : Packt Publishing, 2021, 188c

11. Simon, M. Practical Electronics for Inventors, Fourth Edition /M. Simon. − M.: McGraw-Hill Education TAB, 2020, 1056c.

12. Thorpe, E. Arduino: Simple and Effective Strategies to Arduino Programming /E. Thorpe. − M.: Independently published, 2019, 228c.

13. Ali Darejeh and Dalbir Singh. An investigation on Ribbon interface design guidelines for people with less computer literacy. Computer Standards & Interfaces, 36(5):808–820, September 2022.

14. Adriansyah, A., & Dani, A. W. Design of small smart home system based on Arduino. In Proceedings of the Electrical Power, Electronics, Communications, Controls and Informatics Seminar, 2021, pp. 121-125.

15. Arpita, R., Saxena, K., & Bhadra, A.A. Internet of Things. International journal of Engineering Studies and Technical Approach,2020, pp. 1-36.

16. Aru O E ,Ihekweaba G, Opara F K. Design Exploration of a Microcontroller Based RF Remote Control 13amps Wall Socket, Journal of Computer Engineering, 2023, pp. 56-60.

17. Batty, M., Memarian, K., Nienhuis, K., Pichon-Pharabod, J., & Sewell, P. The problem of programming language concurrency semantics. In Proceedings of the European Symposium on Programming Languages and Systems, 2019, pp. 283-307.

18. Bingol, O., Tasdelen, K., Keskin, Z., & Kocaturk, Y. E. (2014). Web-based smart home automation: PLC-controlled implementation. Acta Polytechnica Hungarica, 2023, pp. 51-63.

19. Chew, I., Kalavally, V., Tan, C. P., & Parkkinen, J. A spectrally tunable smart led lighting system with closed-loop control. Sensors Journal, 2019, pp. 52-59.

20. Dinesh, R., Pravin, S. A., Aravindhan, M., & Rajeswari, D. Library access system smartphone application using Android. International Journal of Computer Science and Mobile Computing, 2019, pp. 142-149.

21. Fatehnia, M., Paran, S., Kish, S., & Tawfiq, K. Automating double ring infiltrometer with an Arduino microcontroller. Geoderma, 2020, pp. 133-139.

22. Fitriyah, H., Widasari, E. R., Sagita, R. D., & Bagus, A. H. Design of remote control for smart home using interaction design method. In Proceedings of the

International Conference on Advanced Computer Science and Information Systems, 2019, pp. 91-96.

23. Kodali, R.K., Jain, V., Bose, S., & Boppana, L. IoT Based Smart Security and Home Automation System. In Proceedings of the International Conference on Computing, Communication and Automation,2021, pp. 86-89.

24. Lin, H., & Bergmann, N.W. IoT Privacy and Security Challenges for Smart Home Environments. Information, 2024, pp. 1-15.

25. Винничук М. Д., Власій О. О., Гладкий А. І. Можливості використання середовища App Inventor при вивченні інформатики для реалізації міждисциплінарних зв’язків // Дослідження різних напрямів розвитку психології та педагогіки: Збірник наукових робіт учасників міжнародної науково-практичної конференції (15–16 листопада 2019 р., м. Одеса). – Одеса: ГО «Південна фундація педагогіки», 2019,с.132.

26. Винничук М. Д, Власій О. О., Гладкий А. І. Розробка вікторини в APP INVENTOR 2// Комп’ютерні науки, інформаційні технології та системи управління: матеріали Міжнародної науково-технічної конференції здобувачів вищої освіти та молодих вчених, м. Івано-Франківськ, 27–29 листопада 2019 року / наук. ред. Л.Б. Петришин. – Електрон. дані. – Івано-Франківськ : Прикарпатський національний університет імені Василя Стефаника, 2019.

27. Marius, R., Remus, D., Monica, L., & Andreea, L. A Smart House in the Context of Internet of Things. International Journal of Internet of Things and Web Services, 2020, pp. 38-42.

28. Ransing, R. S., & Rajput, M. Smart home for elderly care, based on wireless sensor network. In Proceedings of the International Conference on Nascent Technologies in the Engineering Field, 2018, pp. 1-5.

29. Sumithra, P., Jane, D., Karthika, P., & Gavaskar, S. A smart environmental monitoring system using Internet of Things. International Journal of Scientific Engineering and Applied Science, 2020, pp. 261-265.

30. MIT. MIT App Inventor. MIT App Inventor Main Page. URL : https://appinventor.mit.edu/ (дата звернення: 22.11.2025).

31. Arduino. Arduino Software Release Notes. Arduino Articles. URL : https://www.arduino.cc/en/Main/ReleaseNotes (дата звернення: 13.04.2025).

32. Arduino.ua. Arduino marketplace. Arduino.ua Main Page. URL : https://arduino.ua/ (дата звернення: 24.11.2025).

# ДЕМОНСТРАЦІЙНІ МАТЕРІАЛИ

**ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ ІНФОРМАЦІЙНО-КОМУНІКАЦІЙНИХ ТЕХНОЛОГІЙ**
**НАВЧАЛЬНО-НАУКОВИЙ ІНСТИТУТ ІНФОРМАЦІЙНИХ ТЕХНОЛОГІЙ**
**КАФЕДРА КОМП'ЮТЕРНОЇ ІНЖЕНЕРІЇ**

## КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

на тему: «Система «Розумний будинок» на основі мікроконтролера Cortex M4»

здобувач вищої освіти гр.КСДМ-62
Артем ВОЛІН
Керівник: *PhD*
Кирило СОКОЛОВ

**МЕТА ТА ЗАВДАННЯ РОБОТИ** 

***Мета роботи*** – розробка системи керування «Розумним будиноком » із застосуванням мікроконтролера Cortex M4.

***Об'єкт дослідження*** – процес створення системи керування «Розумний будинок».

***Предмет дослідження*** – система управління «Розумний будинк».

***Завдання магістерської кваліфікаційної роботи:***

- огляд загальних положенньб, актуальних тенденції формування та розвитку ринку систем «розумний будинок»;
- дослідженя особливостей, технічних характеристик мікропроцесора cortex m4 та засобів реалізації системи;
- практична реалізація домашнього центру керування із застосуванням STM32.

## ТЕНДЕНЦІЇ СПОЖИВАЧІВ У СФЕРІ РОЗУМНОГО ДОМУ

3

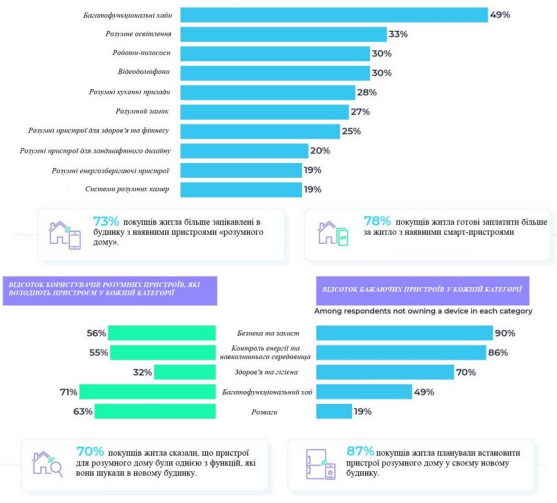



Рис.1. Найбажаніші пристрої для розумного дому

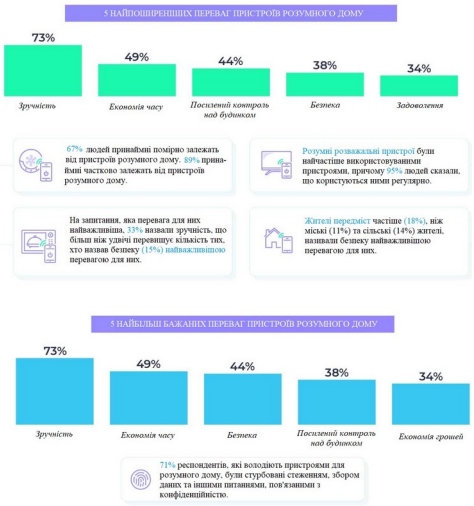



Рис.2. Статистика найпоширеніших переваг використання пристроїв «Розумний будинок»

## АНАЛІЗ РОЗМІРУ, ЧАСТКИ ТА ТЕНДЕНЦІЙ СВІТОВОГО РИНКУ РОЗУМНОГО ДОМУ

4

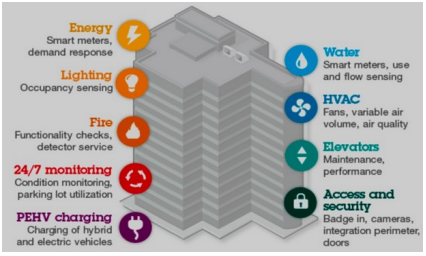



Рис.3.Елементи оптимізації роботи технології розумних будівель

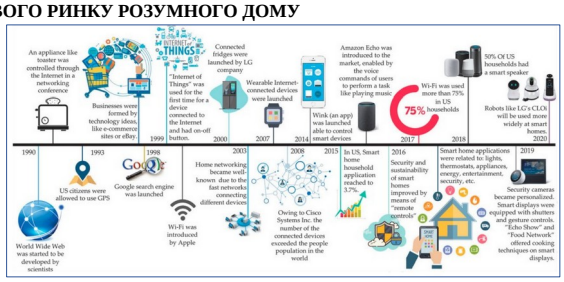



Рис. 4. Хронологія еволюції розумних будинків та розумних пристроїв

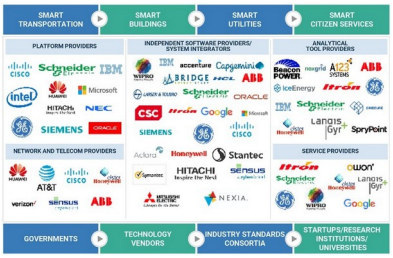



Рис.5. Лідери ринку




Рис.6. Глобальний ринок розумного будинку

## ГЛОБАЛЬНА СТАТИСТИКА ТЕХНОЛОГІЙ РОЗУМНОГО ДОМУ ТА ЇХ ПЕРСПЕКТИВА РОСТУ

5

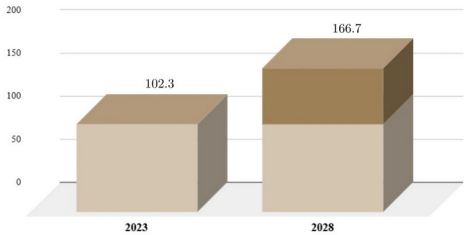



Рис.7. Глобальна ринкова вартість технологій розумного дому

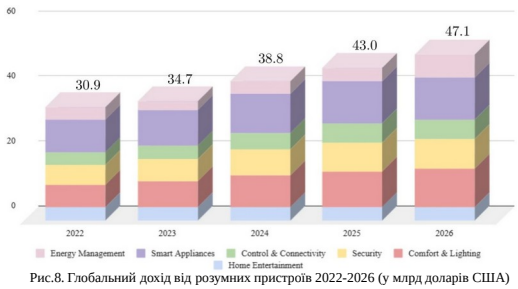



Рис.8. Глобальний дохід від розумних пристроїв 2022-2026 (у млрд доларів США)

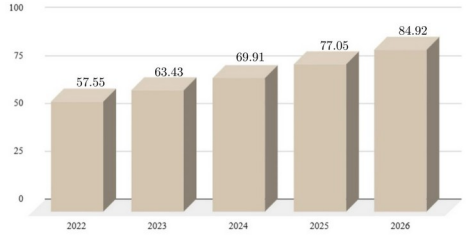



Рис.9. Домогосподарства, які використовують пристрої розумного дому, 2022-2026 (у мільйонах)

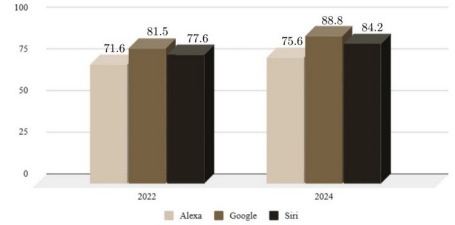



Рис.10. Користувачі голосових асистентів за брендами, 2022-2024 (мільйон)

## АНАЛІЗ СІМЕЙСТВА ПРОЦЕСОРІВ CORTEX-M

6

Табл.1.Сімейство процесорів Cortex-M

| | Описи |
|---|---|
| Cortex-M0 | Дуже маленький процесор (починаючи з 12K вентилів) для недорогих, наднизькоенергетичних мікроконтролерів та глибоко вбудованих застосувань |
| Cortex-M0+ | Найбільш енергоефективний процесор для невеликих вбудованих систем. Подібний за розміром та програмістською моделлю до процесора Cortex-M0, але з додатковими функціями, такими як одноцикловий інтерфейс вводу/виводу та переміщення векторних таблиць. |
| Cortex-M1 | Невеликий процесор, оптимізований для проектування FPGA, що забезпечує реалізацію тісно зв'язаної пам'яті (TCM) з використанням блоків пам'яті на FPGA. Той самий набір команд, що й у Cortex-M0. |
| Cortex-M3 | Невеликий, але потужний вбудований процесор для малопотужних мікроконтролерів, який має багатий набір інструкцій для швидшої обробки складних завдань. Він має апаратний дільник та інструкції множення-нарахування (MAC). Крім того, він також має комплексні функції налагодження та трасування, що дозволяють розробникам програмного забезпечення швидше розробляти свої програми. |
| Cortex-M4 | Він забезпечує всі функції Cortex-M3, з додатковими інструкціями, спрямованими на завдання цифрової обробки сигналів (DSP), таких як обробка кількох інструкцій (SIMD) та швидші одноциклові операції MAC. Крім того, він також має додатковий блок обчислень з плаваючою комою одинарної точності, який підтримує стандарт IEEE 754 з плаваючою комою. |
| Cortex-M7 | Високопродуктивний процесор для високопродуктивних мікроконтролерів та ресурсомістких програм. Він має всі функції ISA, доступні в CortexM4, з додатковою підтримкою обчислень з плаваючою комою подвійної точності, а також додатковими функціями пам'яті, такими як кеш та щільно зв'язана пам'ять (TCM). |

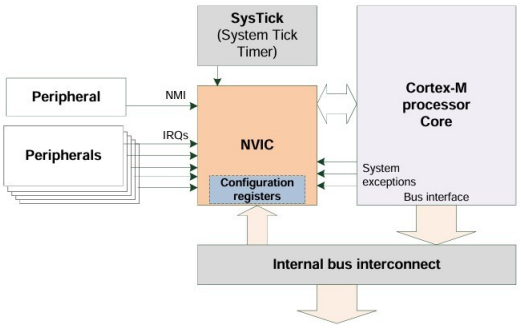



Рис.11 NVIC у процесорі Cortex-M

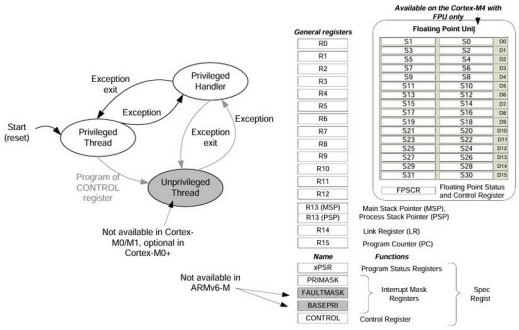



Рис.12 Модель програміста

## ОГЛЯД ТЕХНІЧНИХ ОСОБЛИВОСТЕЙ МІКРОКОНТРОЛЕРА STM32 CORTEX-M4

7

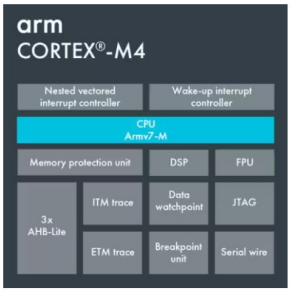



Рис.13. Блок-схема процесора Cortex-M4

Табл. 2. Особливості процесора Cortex-M4

| Функція | Опис |
|---|---|
| Архітектура | Armv7E-M |
| Інтерфейс шини | 3 інтерфейси AMBA AHB-Lite (архітектура шини Гарварду)<br>Інтерфейс AMBA ATB для компонентів налагодження CoreSight |
| Підтримка ISA | Thumb/Thumb-2 |
| Трубопровід | 3-етапна + розгалужена спекуляція |
| Розширення DSP | Одноцикловий 16/32-бітний MAC<br>Одноцикловий подвійний 16-бітний MAC<br>8/16-бітна SIMD-арифметика<br>Апаратне ділення (2-12 циклів) |
| Одиниця обчислень з плаваючою комою | Додатковий блок з плаваючою комою одинарної точності (FPU), сумісний з IEEE 754 |
| Захист пам'яті | Додатковий 8-регіональний MPU з підрегіонами та фоновою областю |
| Маніпуляції з бітами | Інтегровані інструкції обробки бітового поля та бітове смугування на рівні шини |
| Переривання | Немасковане переривання (NMI) + від 1 до 240 фізичних переривань |
| Рівні пріоритету переривань | Від 8 до 256 рівнів пріоритету |
| Контролер переривань пробудження | Необов'язково |
| Режими сну | Інтегровані інструкції WFI та WFE, а також функція сну при виході.<br>Сигнали сну та глибокого сну. Додатковий режим утримання з комплектом керування живленням Arm. |
| Налагодження | Додаткові порти налагодження JTAG та послідовний інтерфейс Wire, до 8 точок зупинки та 4 точок спостереження |
| Трасувати | Додаткова трасування інструкцій (ETM), трасування даних (DWT) та трасування інструментів (ITM) |

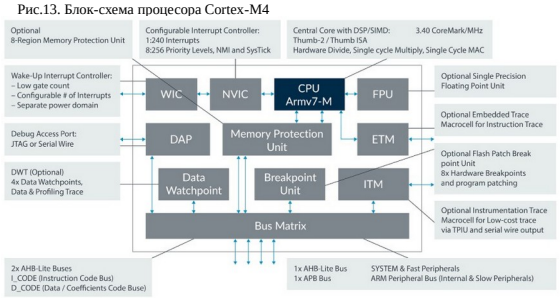



Рис.14.Компоненти процесора Cortex-M4

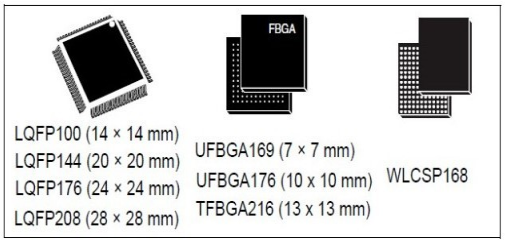



Рис.15. Типи корпусів STM32F469

## ОГЛЯД ПРОТОКОЛІВ ДОМАШНЬОЇ АВТОМАТИЗАЦІЇТА ЗАСТОСУВАННЯ CORTEX-M ТА ІНТЕРНЕТ РЕЧЕЙ






Рис.16 Протоколи домашньої автоматизації

Табл.3. Особливості та порівняння протоколів

| Зміни | Wi-Fi | Z-Wave | ZigBee | Thread | BLE |
|---|---|---|---|---|---|
| PHY/MAC Standart | IEEE 802.11.1 | ITU-T G.9959 | IEEE 802.15.4 | IEEE 802.15.4 | IEEE 802.15.1 |
| Frecmency Band | 2.4 GHz | 900 MHz | 2.4 GHz | 2.4 GHz | 2.4 GHz |
| Nominal Range (0 dBm) | 100m | 30-100m | 10-100m | 10-100m | 30m |
| Max. Data Rate | 54 mbit/s | 40-100kbit/s | 250 kbit/s | 250 kbit/s | 1 mbit/s |
| Tpology | Start | Mesh | Mesh | Mesh | Scattemet |
| Power Usage | Hight | Low | Low | Low | Low |
| Alliance | Wi-Fi Alliance | Z-Wave Alliance | ZigBee Alliance | Thread Group | Bluetooth SIG |

## ДОСЛІДЖЕННЯ ОСОБЛИВОСТЕЙ СИСТЕМИ, АПАРАТНИХ СКЛАДОВИХ ТА ПРОЦЕС ЇХ ПІДКЛЮЧЕННЯ



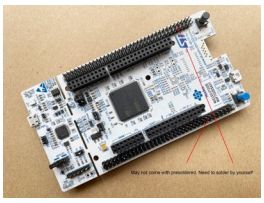


Рис.17 Приклад припаяних роз'ємів

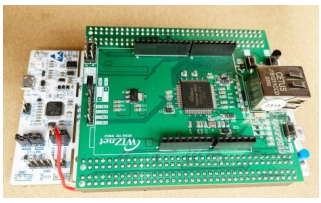


Рис. 18 Кріплення екрану TOE W5300 з платою STM32 Nucleo

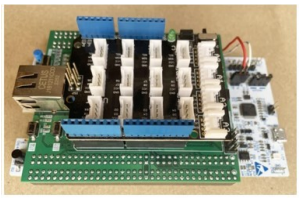


Рис. 19 Підключення датчиків Grove

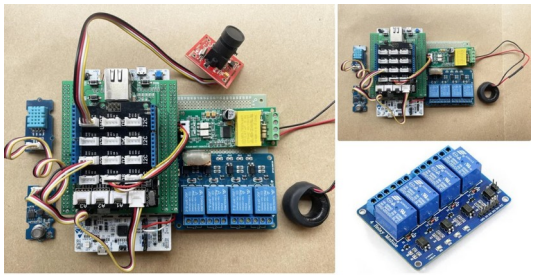


Рис.20. Підключення компнентів

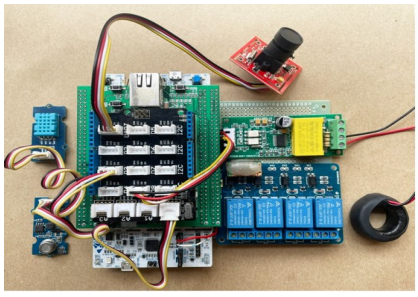


Рис.21 підключення камери до порту UART базового щита

## ОГЛЯД СХЕМИ ПРОЕКТУ



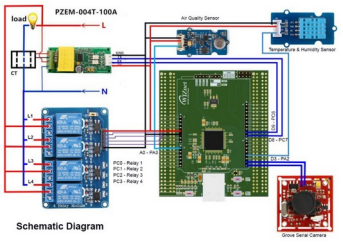



Рис. 22 Повна схема апаратного забезпечення

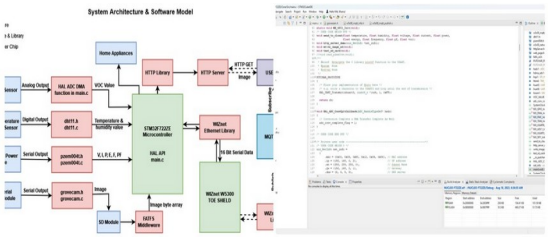



Рис.23 Архітектура системи та модель програмного забезпечення

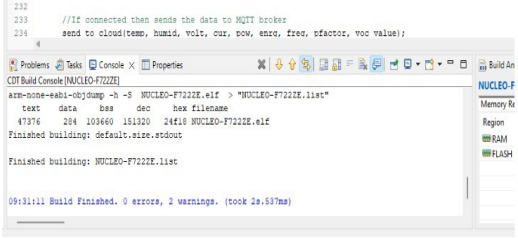



Рис.24 Процес створення проекту

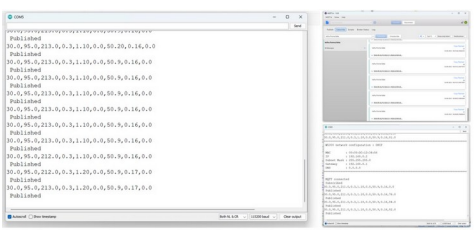


Рис.25 Вихідний код

**РОЗРОБКА ДОДАТКУ ДЛЯ ANDROID** ***11***



Рис.26 Етап розробки програми

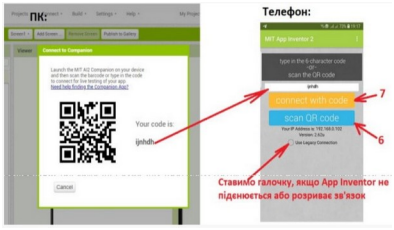



Рис.28 Приклад підключення додатку на смартфон




Рис.29 Інтерфейс програми контролю



Рис.27 Повний блок розробки програмної логіки

**ВИСНОВКИ** ***12***

У першому розділі досліджено ключові чинники розвитку ринку систем «розумний будинок» та **отримано узагальнену оцінку сучасного стану й тенденцій його зростання**, що дало змогу визначити основні мотиви споживачів — комфорт, енергоефективність і безпека — та окреслити структуру глобального й регіонального ринків із урахуванням провідних виробників.

У другому розділі здійснено аналіз технічних основ систем домашньої автоматизації на базі мікроконтролерів ARM, зокрема Cortex-M, і **встановлено їхню придатність та ефективність для побудови IoT-рішень**, а також **визначено оптимальні протоколи взаємодії пристроїв «розумного дому»** на основі порівняльного дослідження.

У практичній частині реалізовано центр керування на основі STM32, перевірено конфігурацію апаратних компонентів та розроблено Android-додаток для дистанційного управління, що дозволило **отримати працездатний прототип системи «розумного дому» та експериментально підтвердити його функціональність і потенціал масштабування**.