

Міністерство освіти і науки України

Луцький національний технічний університет
(повне найменування вищого навчального закладу)

Факультет робототехніки та штучного інтелекту
(повне найменування факультету)

Кафедра електроніки, фізики та СМАРТ-систем
(повне найменування кафедри)

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

**ПРОЄКТУВАННЯ ТА ДОСЛІДЖЕННЯ
ЕНЕРГОЕФЕКТИВНОГО ВБУДОВАНОГО ЕЛЕКТРОННОГО
ВУЗЛА ЗБОРУ СЕНСОРНИХ ДАНИХ НА БАЗІ STM32**

**DESIGN AND RESEARCH OF AN ENERGY-EFFICIENT
EMBEDDED ELECTRONIC SENSOR DATA ACQUISITION
NODE BASED ON STM32**

спеціальність 171 Електроніка
(шифр і назва спеціальності)
освітня програма «Електроніка»
(назва освітньої програми)

Виконав: здобувач вищої освіти групи ЕЛ-41
Копюк Андрій Андрійович

(підпис)

Керівник: к.ф.-м.н., доцент
Хвищун Микола Вячеславович

(підпис)

Кваліфікаційну роботу
допущено до захисту
«__» червня 2026 р.
Гарант освітньої програми:
к.т.н., доцент
Мороз Сергій Анатолійович

(підпис)

Луцьк – 2026 року

Факультет комп'ютерних та інформаційних технологій
Кафедра електроніки та телекомунікацій
Ступінь вищої освіти бакалавр
Галузь знань: 17 Електроніка, автоматизація та електронні комунікації
Спеціальність: 171 Електроніка
Освітня програма: «Електроніка»

ЗАТВЕРДЖУЮ
Завідувач кафедри

«__» _____ 20__ р.

ЗАВДАННЯ НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ ЗДОБУВАЧУ ВИЩОЇ ОСВІТИ

Копюку Андрію Андрійовичу

1. Тема кваліфікаційної роботи: *Проектування та дослідження енергоефективного вбудованого електронного вузла збору сенсорних даних на базі STM32*

керівник роботи: *к.ф.-м.н., доцент Хвищун М. В.*

затверджені наказом закладу вищої освіти від «31» грудня 2025 р. № 559/01-02

2. Строк подання здобувачем роботи: 04.06.2026 р.

3. Вихідні дані до роботи: *мікроконтролерна платформа – STM32;*

сенсорний модуль – датчики температури, вологості та атмосферного тиску типу BME280, DHT22 або аналогічні; інтерфейси підключення – I2C, SPI, UART та ADC; модуль передачі даних – Wi-Fi (ESP8266/ESP32); програмне середовище розробки – STM32CubeIDE.

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

Розділ 1. Аналітичний огляд вбудованих систем збору сенсорних даних

Розділ 2. Схемне проектування та принцип роботи пристрою

Розділ 3. Розрахункова апаратно-програмна частина

Розділ 4. Охорона праці та безпека

Висновки

5. Перелік графічного матеріалу

Презентація POWERPOINT (12 слайдів)

6. Консультанти розділів роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис	
		завдання видав	завдання прийняв
<i>Розділ 1. Аналітичний огляд вбудованих систем збору сенсорних даних</i>	<i>Хвищун М. В., доцент</i>		
<i>Розділ 2. Схемне проєктування та принцип роботи пристрою</i>	<i>Хвищун М. В., доцент</i>		
<i>Розділ 3. Розрахункова апаратно-рограмна частина</i>	<i>Хвищун М. В., доцент</i>		
<i>Розділ 4. Охорона праці та безпека</i>	<i>Заблоцький В. Ю., доцент</i>		
<i>Нормоконтроль</i>	<i>Селепина Й. Р., доцент</i>		
<i>Гарант ОП</i>	<i>Мороз С. А., доцент</i>		
<i>Показник запозичень тексту</i>	<i>%</i>		
<i>Академічна доброчесність</i>	<i>Хвищун М. В., доцент</i>		

7. Дата видачі завдання «31» грудня 2025 р.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів кваліфікаційної роботи	Строк виконання етапів роботи	Примітка
1.	<i>Розділ 1. Аналітичний огляд систем широтно-імпульсного керування</i>	до 01.03.2026 р.	
2.	<i>Розділ 2. Схемне проєктування та принцип роботи системи</i>	до 15.03.2026 р.	
3.	<i>Розділ 3. Розрахункова апаратно-рограмна частина</i>	до 01.04.2026 р.	
4.	<i>Розділ 4. Охорона праці та безпека</i>	до 10.04.2026 р.	
5.	<i>Висновки</i>	до 20.04.2026 р.	
6.	<i>Формування списку використаних джерел</i>	до 30.04.2026 р.	
7.	<i>Оформлення пояснювальної записки та ілюстративного матеріалу</i>	до 10.05.2026 р.	
8.	<i>Нормоконтроль</i>	до 20.05.2026 р.	
9.	<i>Інструментальна перевірка на академічний плагіат</i>	до 30.05.2026 р.	
10.	<i>Представлення кваліфікаційної роботи до захисту</i>	до 04.06.2026 р.	

Здобувач вищої освіти _____ Андрій КОПЮК

Керівник роботи _____ Микола ХВИЩУН

АНОТАЦІЯ

Копюк А. А. Проєктування та дослідження енергоефективного вбудованого електронного вузла збору сенсорних даних на базі STM32. Рукопис. Кваліфікаційна робота бакалавра ОП «Електроніка» спеціальності 171 «Електроніка». Луцький національний технічний університет. Луцьк, 2026. 60 с.

Кваліфікаційна робота бакалавра складається зі вступу, чотирьох розділів, висновків, списку використаних джерел.

У першому розділі проведено аналіз сучасних вбудованих систем збору сенсорних даних, мікроконтролерних платформ, сенсорів, інтерфейсів передачі даних та методів підвищення енергоефективності. Обґрунтовано вибір мікроконтролера STM32 для реалізації енергоефективного сенсорного вузла.

У другому розділі виконано схемне проєктування пристрою. Розроблено структурну, функціональну та принципову електричну схеми, обрано елементну базу, сенсори та інтерфейси підключення. Описано принцип роботи й алгоритм функціонування вузла збору даних.

У третьому розділі проведено розрахунок енергоспоживання системи та джерела живлення. Вибрано режими енергозбереження STM32, розроблено програмне забезпечення для збору, обробки й передачі сенсорних даних.

У четвертому розділі розглянуто питання охорони праці та безпеки під час проєктування, налагодження й експлуатації вбудованої електронної системи. Проаналізовано небезпечні фактори, вимоги електробезпеки та ергономіки робочого місця.

У висновках підсумовано результати роботи. Встановлено, що розроблений електронний вузол збору сенсорних даних на базі STM32 забезпечує енергоефективну роботу, надійність, можливість інтеграції з IoT-системами та збільшення тривалості автономного функціонування.

Ключові слова: STM32, сенсорні дані, вбудована система, енергоефективність, мікроконтролер, енергозбереження, сенсорний вузол.

ABSTRACT

Kopiuk A. Design And Research Of An Energy-Efficient Embedded Electronic Sensor Data Acquisition Node Based On STM32. Manuscript. Qualification Work for the Bachelor's Degree in the Educational Program «Electronics», Specialty 171 «Electronics». Lutsk National Technical University. Lutsk, 2026. 60 p.

The bachelor's qualification work consists of an introduction, four chapters, conclusions, a list of references.

In the first chapter, an analysis of modern embedded sensor data acquisition systems, microcontroller platforms, sensors, data transmission interfaces, and methods of improving energy efficiency was carried out. The choice of the STM32 microcontroller for the implementation of an energy-efficient sensor node was substantiated.

In the second chapter, the circuit design of the device was developed. Structural, functional, and schematic electrical diagrams were created, and the electronic components, sensors, and communication interfaces were selected. The operating principle and functional algorithm of the sensor data acquisition node were described.

In the third chapter, the power consumption of the system and the power supply unit were calculated. STM32 low-power operating modes were selected, and software for sensor data acquisition, processing, and transmission was developed.

In the fourth chapter, occupational health and safety issues related to the design, debugging, and operation of the embedded electronic system were considered. Hazardous factors, electrical safety requirements, and workplace ergonomics were analyzed.

The conclusions summarize the results of the work. It was established that the developed STM32-based sensor data acquisition node provides energy-efficient operation, reliability, the possibility of integration with IoT systems, and an increased duration of autonomous operation.

Keywords: STM32, Sensor Data, Embedded System, Energy Efficiency, Microcontroller, Power Saving, Sensor Node.

ЗМІСТ

ВСТУП.....	7
РОЗДІЛ 1 АНАЛІТИЧНИЙ ОГЛЯД ВБУДОВАНИХ СИСТЕМ ЗБОРУ СЕНСОРНИХ ДАНИХ	9
1.1 Огляд сучасних систем збору сенсорних даних та технологій IoT.....	9
1.2 Аналіз мікроконтролерних платформ та обґрунтування вибору STM32..	12
1.3 Аналіз енергоефективності вбудованих систем та методів її підвищення.....	16
1.4 Аналіз сенсорів, інтерфейсів та архітектури систем збору даних	21
РОЗДІЛ 2 СХЕМНЕ ПРОЄКТУВАННЯ ТА ПРИНЦИП РОБОТИ ПРИСТРОЮ	26
2.1 Розробка структурної та функціональної схеми системи	26
2.2 Вибір елементної бази та розробка принципової електричної схеми.....	30
2.3 Організація взаємодії сенсорів та інтерфейсів передачі даних	37
2.4 Алгоритм роботи енергоефективного вузла збору сенсорних даних	39
РОЗДІЛ 3 РОЗРАХУНКОВА АПАРАТНО-ПРОГРАМНА ЧАСТИНА	43
3.1 Розрахунок енергоспоживання та джерела живлення системи	43
3.2 Вибір режимів енергозбереження STM32 та оцінка їх ефективності.....	45
3.3 Розробка програмного забезпечення для збору та обробки сенсорних даних	48
РОЗДІЛ 4 ОХОРОНА ПРАЦІ ТА БЕЗПЕКА	53
4.1 Аналіз небезпечних факторів та електробезпека при роботі з електронними пристроями.....	53
4.2 Ергономіка робочого місця та заходи безпеки під час експлуатації системи	55
ВИСНОВКИ.....	58
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	59

ВСТУП

Актуальність теми. Сучасний розвиток інформаційних технологій, телекомунікаційних систем та концепції Інтернету речей (IoT) супроводжується стрімким зростанням кількості вбудованих електронних пристроїв, призначених для збору, обробки та передачі даних про стан навколишнього середовища. Такі пристрої широко використовуються у промисловій автоматизації, енергетиці, транспортних системах, сільському господарстві, медицині, системах моніторингу та розумних будинках. Однією з основних вимог до сучасних сенсорних вузлів є забезпечення високої енергоефективності, оскільки значна частина таких систем працює автономно від акумуляторів або батарей та повинна функціонувати тривалий час без обслуговування.

Енергоефективність вбудованих систем безпосередньо впливає на тривалість автономної роботи, надійність функціонування та економічну доцільність їх використання. Для досягнення високої енергоефективності необхідно застосовувати сучасні мікроконтролери з низьким енергоспоживанням, оптимізовані алгоритми роботи та режими енергозбереження. Особливий інтерес у цьому напрямку становлять мікроконтролери сімейства STM32, які поєднують високу продуктивність, широкий набір периферійних модулів та підтримку спеціалізованих режимів зниженого енергоспоживання.

Системи збору сенсорних даних на базі STM32 дозволяють реалізовувати функції вимірювання температури, вологості, тиску, освітленості та інших фізичних параметрів із подальшою передачею інформації через сучасні комунікаційні інтерфейси. Використання таких систем забезпечує можливість інтеграції з IoT-платформами та створення інтелектуальних мереж моніторингу в реальному часі.

Метою кваліфікаційної роботи є проектування та дослідження енергоефективного вбудованого електронного вузла збору сенсорних даних на базі мікроконтролера STM32.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити такі завдання:

- провести аналіз сучасних вбудованих систем збору сенсорних даних та технологій IoT;
- виконати аналіз мікроконтролерних платформ та обґрунтувати вибір STM32L432KC;
- дослідити методи підвищення енергоефективності вбудованих систем;
- обрати сенсори та інтерфейси передачі даних для реалізації пристрою;
- розробити структурну, функціональну та принципову електричну схеми системи;
- реалізувати алгоритм роботи вузла збору сенсорних даних;
- виконати розрахунок енергоспоживання та параметрів джерела живлення;
- розробити програмне забезпечення для збору, обробки та передачі даних на базі STM32L432KC.

Об'єктом дослідження є процес функціонування вбудованих систем збору сенсорних даних у складі сучасних IoT-пристроїв.

Предметом дослідження є методи та засоби підвищення енергоефективності вбудованого електронного вузла збору сенсорних даних на базі мікроконтролера STM32L432KC.

Практичне значення роботи полягає у розробці енергоефективного сенсорного вузла на базі STM32, який може бути використаний у системах моніторингу навколишнього середовища, промислової автоматизації, розумних будинках, телекомунікаційних системах та інших IoT-застосуваннях, де важливими є низьке енергоспоживання та висока надійність роботи.

Під час виконання кваліфікаційної роботи технології штучного інтелекту використовувалися лише як додатковий інструмент для підготовки, коригування та вдосконалення текстових матеріалів, а також для пошуку й аналізу науково-технічної літератури. Остаточна перевірка, опрацювання та оцінка всіх результатів дослідження здійснювалися автором самотійно відповідно до вимог академічної доброчесності.

РОЗДІЛ 1

АНАЛІТИЧНИЙ ОГЛЯД ВБУДОВАНИХ СИСТЕМ ЗБОРУ СЕНСОРНИХ ДАНИХ

1.1 Огляд сучасних систем збору сенсорних даних та технологій IoT

Сучасні вбудовані електронні системи дедалі частіше використовуються для автоматизованого збору, обробки та передавання даних про стан об'єктів і навколишнього середовища. Такі системи є важливою складовою промислової автоматизації, екологічного моніторингу, енергетики, транспорту, медицини, сільського господарства та систем «розумного будинку». Їх основне призначення полягає у перетворенні фізичних параметрів у цифрову інформацію, яка може бути використана для контролю, аналізу, прогнозування або керування технічними процесами [1].

Особливого значення системи збору сенсорних даних набули у зв'язку з розвитком концепції Інтернету речей, або IoT. Інтернет речей передбачає об'єднання великої кількості фізичних пристроїв у спільну інформаційну мережу, у межах якої пристрої можуть автоматично обмінюватися даними без постійної участі людини. У таких системах сенсорні вузли виконують роль первинних джерел інформації, оскільки саме вони забезпечують вимірювання параметрів середовища або стану технічного об'єкта [2].

Типова IoT-система збору сенсорних даних має багаторівневу структуру. На першому рівні розміщуються сенсори, які виконують вимірювання температури, вологості, тиску, освітленості, руху або інших фізичних величин. На другому рівні працює вбудований електронний вузол, основою якого є мікроконтролер. Він здійснює приймання сигналів від сенсорів, їх первинну обробку та підготовку до передавання. На наступному рівні використовується комунікаційний модуль, за допомогою якого дані передаються через мережу Інтернет до хмарної платформи або локального сервера [3].

Сенсори здійснюють вимірювання параметрів середовища, мікроконтролер виконує первинну обробку даних, а комунікаційний модуль

забезпечує їх передавання до хмарного сервера для зберігання, аналізу та подальшого доступу користувача.

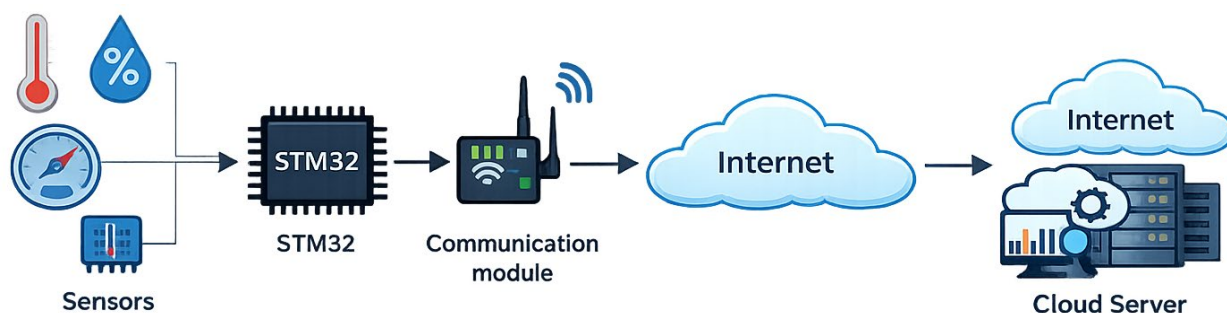


Рисунок 1.1 – Загальна структура IoT-системи збору сенсорних даних [3]

Застосування хмарних платформ у системах збору даних дає змогу зберігати великі обсяги інформації, виконувати її аналіз та забезпечувати доступ до результатів вимірювань із різних пристроїв. Це є важливим для систем віддаленого моніторингу, де користувач повинен мати можливість контролювати стан об'єкта незалежно від свого місцезнаходження. У таких системах дані можуть відображатися через вебінтерфейс, мобільний застосунок або спеціалізовану диспетчерську систему.

У таблиці 1.1 наведено основні напрями використання систем збору сенсорних даних. Незалежно від сфери застосування, такі системи виконують спільну функцію – отримання інформації від сенсорів і передавання її для подальшої обробки.

Однією з ключових вимог до сучасних сенсорних систем є автономність роботи. Значна частина таких пристроїв експлуатується у віддалених місцях або в умовах, де регулярне технічне обслуговування є ускладненим. Тому важливими характеристиками вузлів збору даних є низьке енергоспоживання, стабільність роботи, можливість переходу в режими очікування та підтримка ефективних алгоритмів передавання інформації [4].

Ще однією важливою тенденцією розвитку IoT-систем є використання локальної обробки даних. Це означає, що частина операцій виконується безпосередньо на рівні сенсорного вузла, а до хмарного сервера передаються вже

підготовлені або узагальнені дані.

Таблиця 1.1 – Сфери застосування систем збору сенсорних даних

Сфера застосування	Приклади контрольованих параметрів	Призначення системи
Промислова автоматизація	Температура, вібрація, тиск	Контроль обладнання та технологічних процесів
Енергетика	Напруга, струм, температура	Моніторинг енергетичних установок
Сільське господарство	Вологість ґрунту, температура, освітленість	Автоматизація поливу та контролю мікроклімату
Екологічний моніторинг	Якість повітря, вологість, атмосферний тиск	Спостереження за станом довкілля
Розумний будинок	Температура, рух, освітленість	Автоматизоване керування побутовими системами

Такий підхід дозволяє зменшити навантаження на канали зв'язку, скоротити затримки передавання та знизити загальне енергоспоживання пристрою.

Для реалізації таких систем доцільно використовувати мікроконтролери, які поєднують достатню продуктивність, широкий набір периферійних інтерфейсів та підтримку енергоощадних режимів. Саме тому у подальших підрозділах роботи буде розглянуто мікроконтролерні платформи, методи підвищення енергоефективності, а також сенсори й інтерфейси, які можуть застосовуватися у складі енергоефективного вузла збору сенсорних даних.

Отже, сучасні системи збору сенсорних даних є основою багатьох IoT-рішень і забезпечують автоматизоване отримання інформації про стан об'єктів та середовища. Їх розвиток спрямований на підвищення автономності, надійності, енергоефективності та можливості інтеграції з хмарними

платформами. Це обґрунтовує актуальність розробки енергоефективного вбудованого електронного вузла для збору сенсорних даних на базі STM32.

1.2 Аналіз мікроконтролерних платформ та обґрунтування вибору STM32

Мікроконтролер є центральним елементом вбудованого електронного вузла збору сенсорних даних. Він забезпечує приймання інформації від сенсорів, її первинну обробку, керування периферійними пристроями та передавання даних до зовнішніх систем. Від вибору мікроконтролерної платформи залежать продуктивність, енергоспоживання, надійність, вартість і можливість подальшої модернізації пристрою [5].

Для реалізації сучасних вбудованих систем використовуються різні мікроконтролерні платформи, серед яких найбільш поширеними є Arduino, ESP32 та STM32. Кожна з них має свої переваги та обмеження. Arduino часто використовується в навчальних і простих прикладних проєктах, ESP32 є популярною платформою для бездротових IoT-пристроїв, а STM32 широко застосовується в професійних, промислових та енергоефективних системах.

Arduino базується на мікроконтролерах AVR і характеризується простотою програмування, наявністю великої кількості бібліотек та доступністю для швидкого прототипування. Проте для задач, пов'язаних із низьким енергоспоживанням, розширеною периферією та стабільною роботою у складних умовах, можливості Arduino є обмеженими. Така платформа доцільна переважно для навчання, простих пристроїв керування та лабораторних макетів.

ESP32 має значно вищу продуктивність, підтримує Wi-Fi та Bluetooth, а також дозволяє швидко створювати пристрої з бездротовим обміном даними. Водночас інтегровані бездротові модулі можуть суттєво збільшувати енергоспоживання, особливо під час передавання даних. Тому для автономних вузлів, де головним критерієм є тривалий час роботи від батареї, використання ESP32 потребує ретельної оптимізації режимів роботи.

Мікроконтролери STM32 розроблені компанією STMicroelectronics і базуються на ядрах ARM Cortex-M. Вони мають широкий модельний ряд, що дозволяє обирати пристрій відповідно до конкретних вимог: від простих малопотужних контролерів до високопродуктивних мікроконтролерів із розширеною периферією [6]. Для сенсорних вузлів особливо важливими є серії STM32L та STM32U, які орієнтовані на застосування з низьким енергоспоживанням.

На рисунку 1.2 подано порівняння мікроконтролерних платформ для сенсорних систем



Рисунок 1.2 – Порівняння мікроконтролерних платформ для сенсорних систем [5]

Для вбудованого вузла збору сенсорних даних важливими є такі характеристики мікроконтролера: кількість інтерфейсів введення-виведення, наявність ADC, підтримка шин I2C, SPI та UART, можливість роботи з таймерами, наявність DMA, підтримка режимів низького споживання та зручність програмування. STM32 забезпечує поєднання цих можливостей, що робить його доцільним вибором для розроблюваної системи [7].

Таблиця 1.2 показує, що STM32 має найбільш збалансовані

характеристики для створення енергоефективного сенсорного вузла, оскільки поєднує розвинену периферію, підтримку низького енергоспоживання та промислову надійність.

Важливою перевагою STM32 є наявність широкого набору периферійних модулів. До них належать аналогово-цифрові перетворювачі, таймери, контролери DMA, інтерфейси I2C, SPI, UART, CAN та інші функціональні блоки.

Таблиця 1.2 – Порівняльна характеристика мікроконтролерних платформ

Параметр	Arduino Uno	ESP32	STM32
Архітектура	AVR	Xtensa / RISC-V	ARM Cortex-M
Типове застосування	Навчальні та прості пристрої	IoT з Wi-Fi / Bluetooth	Промислові та енергоефективні системи
Продуктивність	Невисока	Висока	Від середньої до високої
Периферійні інтерфейси	Обмежені	Розширені	Широкий набір
АЦП	Є	Є	Є, з широкими можливостями
DMA	Немає	Є	Є
Режими енергозбереження	Обмежені	Є	Розвинені
Придатність для автономного сенсорного вузла	Середня	Середня	Висока

Завдяки цьому STM32 може працювати з різними типами сенсорів без необхідності використання великої кількості зовнішніх компонентів.

Ще однією перевагою є підтримка сучасних середовищ розробки. Для STM32 використовується STM32CubeIDE, яке дозволяє конфігурувати

периферію, генерувати початковий код та виконувати налагодження програми. Це спрощує процес розробки та зменшує ймовірність помилок під час налаштування мікроконтролера [8].

На рисунку 1.3 показано загальну архітектуру мікроконтролера STM32.

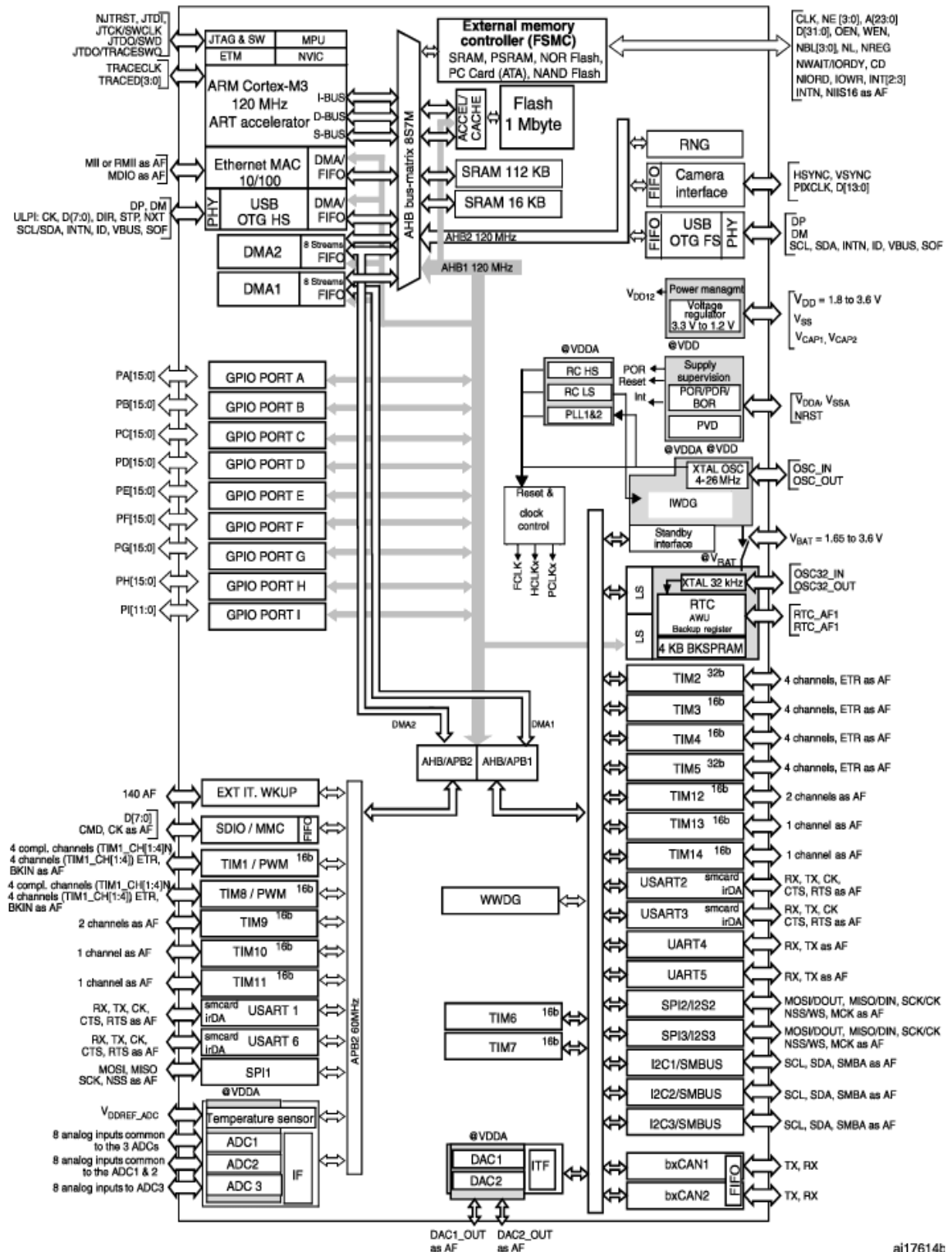


Рисунок 1.3 – Загальна архітектура мікроконтролера STM32 [7]

Окремо слід відзначити підтримку режимів низького енергоспоживання. Для автономного пристрою це є одним із головних критеріїв вибору мікроконтролера. У серіях STM32L4 та STM32U5 реалізовано спеціалізовані режими роботи, які дозволяють зменшити споживання енергії під час очікування, збереження даних або періодичного пробудження пристрою [9].

Для розроблюваного пристрою важливим є не лише збір даних, але й можливість подальшого розширення системи. STM32 дозволяє підключати різні сенсори, зовнішні модулі зв'язку, дисплеї, карти пам'яті та інші периферійні пристрої. Це забезпечує гнучкість архітектури та можливість адаптації пристрою до різних практичних задач.

Таким чином, порівняльний аналіз показує, що Arduino є зручною платформою для навчання та простого прототипування, ESP32 – ефективним рішенням для бездротових IoT-пристроїв, а STM32 – найбільш придатною платформою для створення енергоефективного вбудованого вузла збору сенсорних даних. У межах даної роботи вибір STM32 є обґрунтованим завдяки його продуктивності, широкому набору периферії, підтримці режимів енергозбереження та можливості використання у складніших технічних системах.

1.3 Аналіз енергоефективності вбудованих систем та методів її підвищення

Однією з головних тенденцій розвитку сучасної електроніки є підвищення енергоефективності вбудованих систем. Зростання кількості автономних пристроїв, сенсорних мереж та систем Інтернету речей призводить до необхідності зменшення енергоспоживання електронних вузлів без погіршення їх функціональних можливостей [10]. Особливо актуальним це питання є для систем збору сенсорних даних, які часто працюють від батарей або акумуляторів та повинні забезпечувати тривалий термін автономного функціонування.

Під енергоефективністю вбудованої системи розуміють здатність

виконувати поставлені функції з мінімальними витратами електричної енергії. Для сенсорних вузлів це означає забезпечення максимально можливої тривалості роботи від одного джерела живлення при збереженні необхідної точності вимірювань, швидкодії та надійності роботи [11].

Енергоспоживання сучасного вбудованого пристрою формується декількома основними складовими. Найбільший вплив мають мікроконтролер, система передавання даних, сенсорні модулі та джерело живлення. Частка кожного з цих компонентів залежить від режиму роботи пристрою та особливостей його застосування.

На рисунку 1.4 показано сновні джерела енергоспоживання сенсорного вузла.

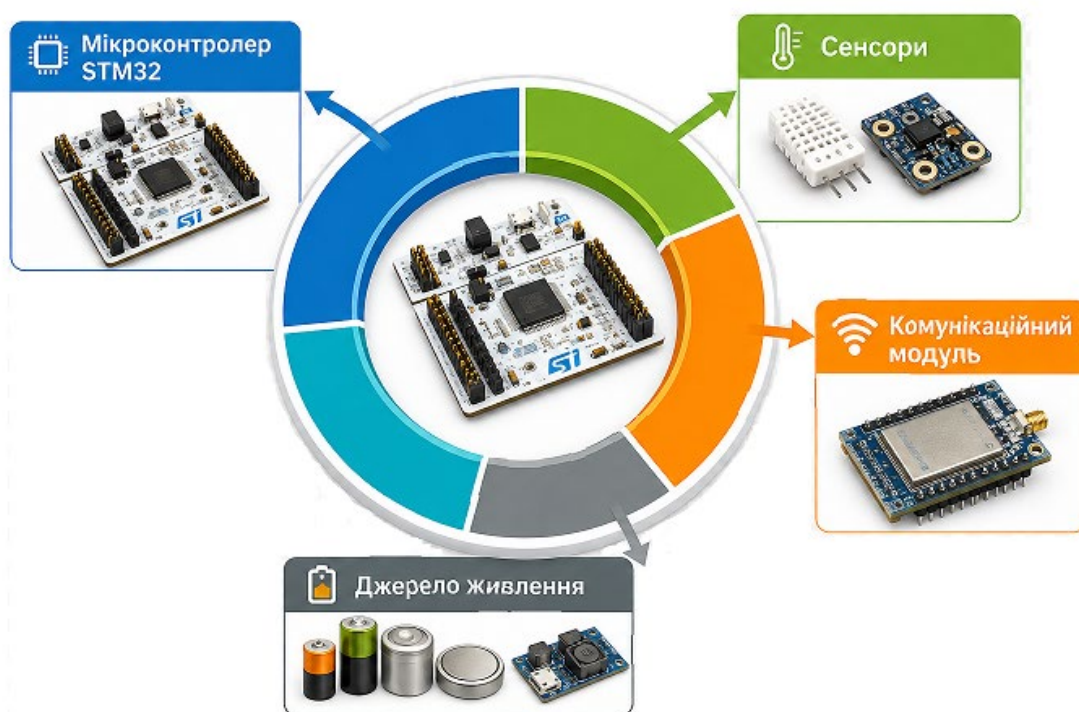


Рисунок 1.4 – Основні джерела енергоспоживання сенсорного вузла [11]

Для більшості сучасних пристроїв найбільше енергії споживають модулі передавання даних. Під час роботи бездротових інтерфейсів споживання може збільшуватися у декілька разів порівняно з режимом очікування. Саме тому в енергоефективних системах широко використовуються алгоритми періодичного

передавання інформації або передавання лише при зміні контрольованих параметрів.

Одним із найбільш ефективних методів підвищення енергоефективності є використання режимів зниженого енергоспоживання. У сучасних мікроконтролерах реалізовані спеціальні режими роботи, які дозволяють тимчасово вимикати окремі функціональні блоки, зберігаючи можливість швидкого повернення до активного режиму [12].

Залежно від рівня енергозбереження можуть вимикатися тактові генератори, периферійні модулі, пам'ять або окремі функціональні вузли мікроконтролера. Такий підхід дозволяє значно скоротити середнє енергоспоживання пристрою без погіршення його функціональних характеристик. У таблиці 1.3 наведені методи, які можуть використовуватися як окремо, так і спільно, забезпечуючи комплексне підвищення енергоефективності системи.

Таблиця 1.3 – Основні підходи до підвищення енергоефективності вбудованих систем

Метод	Принцип дії	Очікуваний ефект
Режими сну	Тимчасове вимкнення частини функціональних блоків	Зниження споживання енергії
Відключення периферії	Вимкнення невикористовуваних модулів	Зменшення струму споживання
Локальна обробка даних	Скорочення кількості переданих повідомлень	Зменшення навантаження на модуль зв'язку
Адаптивне опитування	Зміна частоти вимірювань залежно від ситуації	Підвищення автономності
Енергоощадне живлення	Використання високоефективних стабілізаторів	Зменшення втрат енергії

Суттєвий вплив на енергоспоживання має архітектура програмного

забезпечення. Традиційний підхід із безперервним циклічним опитуванням периферії поступово замінюється подієво – орієнтованими алгоритмами. У таких системах основна програма активується лише після виникнення певної події або надходження сигналу від сенсора.

Важливим напрямом розвитку є застосування концепції Edge Computing. На відміну від традиційних систем, де вся інформація передається до серверної частини, локальна обробка дозволяє виконувати попередній аналіз даних безпосередньо на вбудованому пристрої [13]. Завдяки цьому зменшується кількість переданих повідомлень, скорочується навантаження на мережу та знижується енергоспоживання комунікаційних модулів.

На рисунку 1.5 продемонстровано різницю між системою, що передає всі виміряні дані до сервера, та системою з локальною обробкою інформації. У другому випадку передаються лише важливі або узагальнені дані, що зменшує енергетичні витрати.

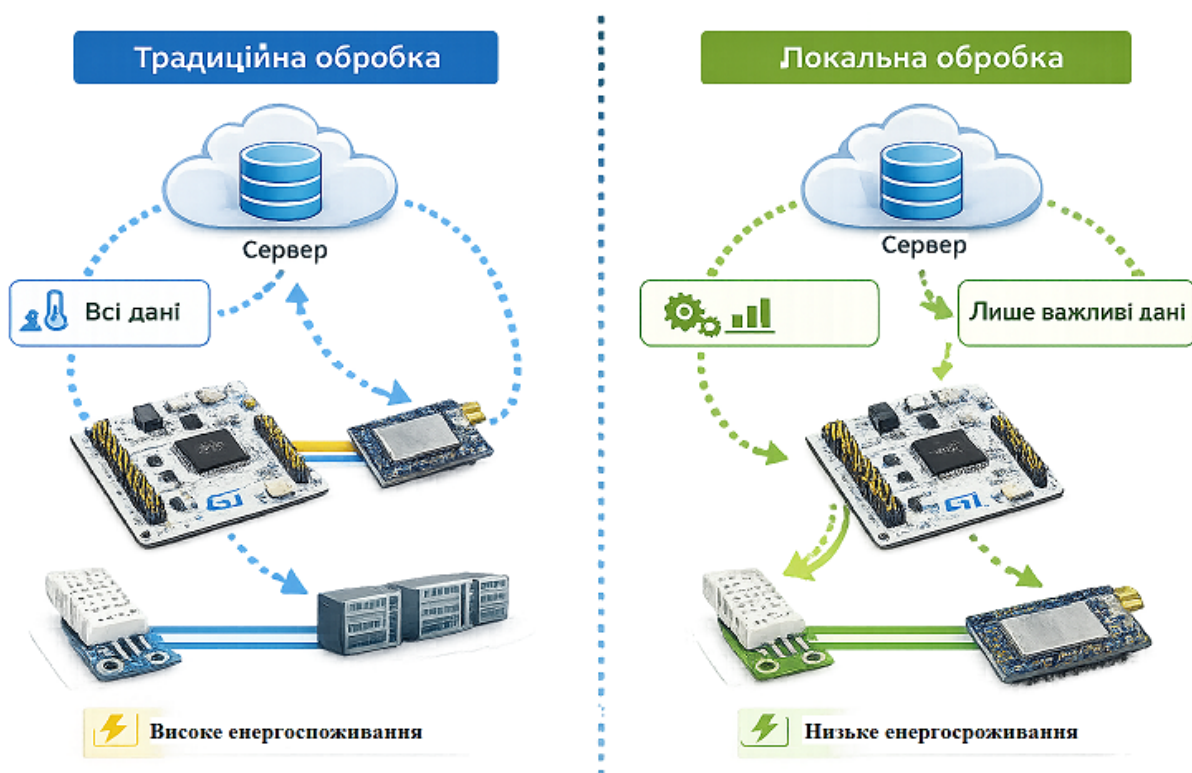


Рисунок 1.5 – Порівняння традиційної та локальної обробки даних

Останніми роками значного розвитку набули технології Energy Harvesting,

які дозволяють використовувати енергію навколишнього середовища для живлення електронних пристроїв. Джерелами такої енергії можуть бути сонячне випромінювання, вібрації, теплові перепади або електромагнітні поля [14].

Технології збору енергії не завжди можуть повністю забезпечити живлення пристрою, проте вони дозволяють збільшити термін служби автономних джерел живлення та зменшити потребу в їх заміні. У поєднанні з енергоощадними алгоритмами це забезпечує можливість створення сенсорних вузлів із багаторічним терміном автономної роботи.

Перспективним напрямом є також використання алгоритмів машинного навчання безпосередньо на рівні мікроконтролера. Такий підхід дозволяє здійснювати локальне прийняття рішень та скорочувати обсяги переданої інформації. Хоча подібні рішення поки що використовуються переважно у складних системах, їх роль у розвитку енергоефективних пристроїв постійно зростає.

На рисунку 1.6 показано взаємозв'язок режимів енергозбереження, локальної обробки даних, технологій Energy Harvesting (Збір енергії) та сучасних алгоритмів оптимізації роботи пристроїв.

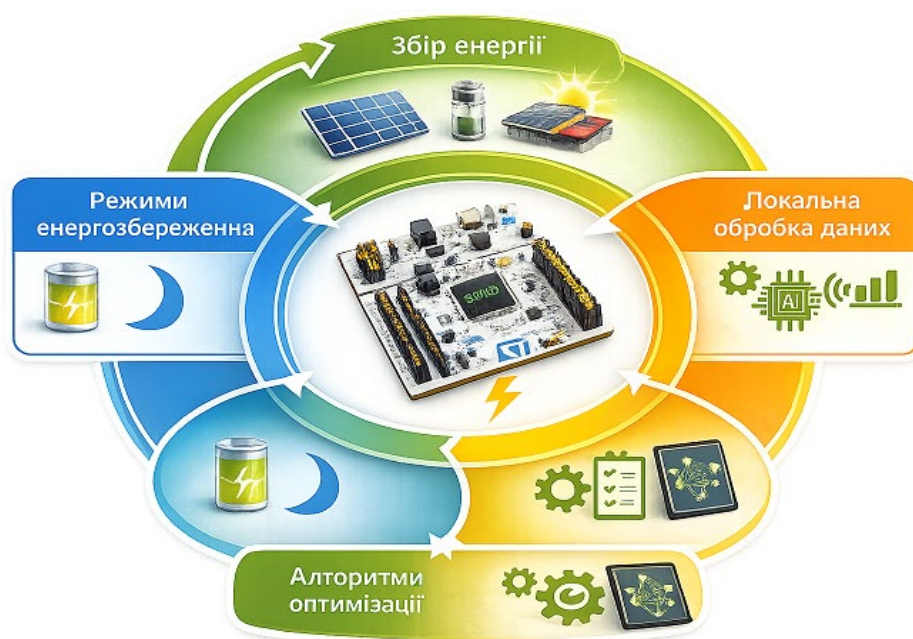


Рисунок 1.6 – Сучасні напрямки підвищення енергоефективності вбудованих систем [14]

Таким чином, підвищення енергоефективності є комплексною задачею, що охоплює апаратні, програмні та алгоритмічні методи оптимізації. Найбільшого ефекту можна досягти шляхом одночасного використання декількох підходів, що дозволяє значно збільшити тривалість автономної роботи пристрою та підвищити ефективність використання енергетичних ресурсів. Проаналізувавши основні чинники, що впливають на енергоефективність вбудованих електронних систем було встановлено, що найбільший ефект забезпечується комплексним використанням режимів енергозбереження, локальної обробки даних, оптимізації програмного забезпечення та енергоощадних джерел живлення. Розглянуто перспективні напрями розвитку, зокрема технології Edge Computing та Energy Harvesting.

1.4 Аналіз сенсорів, інтерфейсів та архітектури систем збору даних

Ефективність роботи сучасних вбудованих систем значною мірою визначається правильним вибором сенсорів та інтерфейсів обміну інформацією. Саме сенсорні модулі забезпечують отримання даних про стан навколишнього середовища або контрольованого об'єкта, а інтерфейси передавання даних дозволяють інтегрувати пристрій у складні інформаційно-вимірювальні системи [15].

У складі вузлів збору сенсорних даних найчастіше використовуються датчики температури, вологості, атмосферного тиску, освітленості, концентрації газів, прискорення та інших фізичних величин. Вибір конкретного типу сенсора залежить від поставлених задач, необхідної точності вимірювань, умов експлуатації та вимог до енергоспоживання.

Для проєктованого пристрою доцільним є використання цифрових сенсорів, які мають вбудовані аналого-цифрові перетворювачі та забезпечують передачу результатів вимірювання безпосередньо у цифровому форматі. Такий підхід дозволяє підвищити завадостійкість системи та спростити обробку даних на рівні мікроконтролера.

На рисунку 1.7 показано взаємодію сенсорів, мікроконтролера STM32, інтерфейсів передавання даних, джерела живлення та зовнішнього сервера або хмарної платформи. Така структура відображає загальну архітектуру розроблюваної системи.

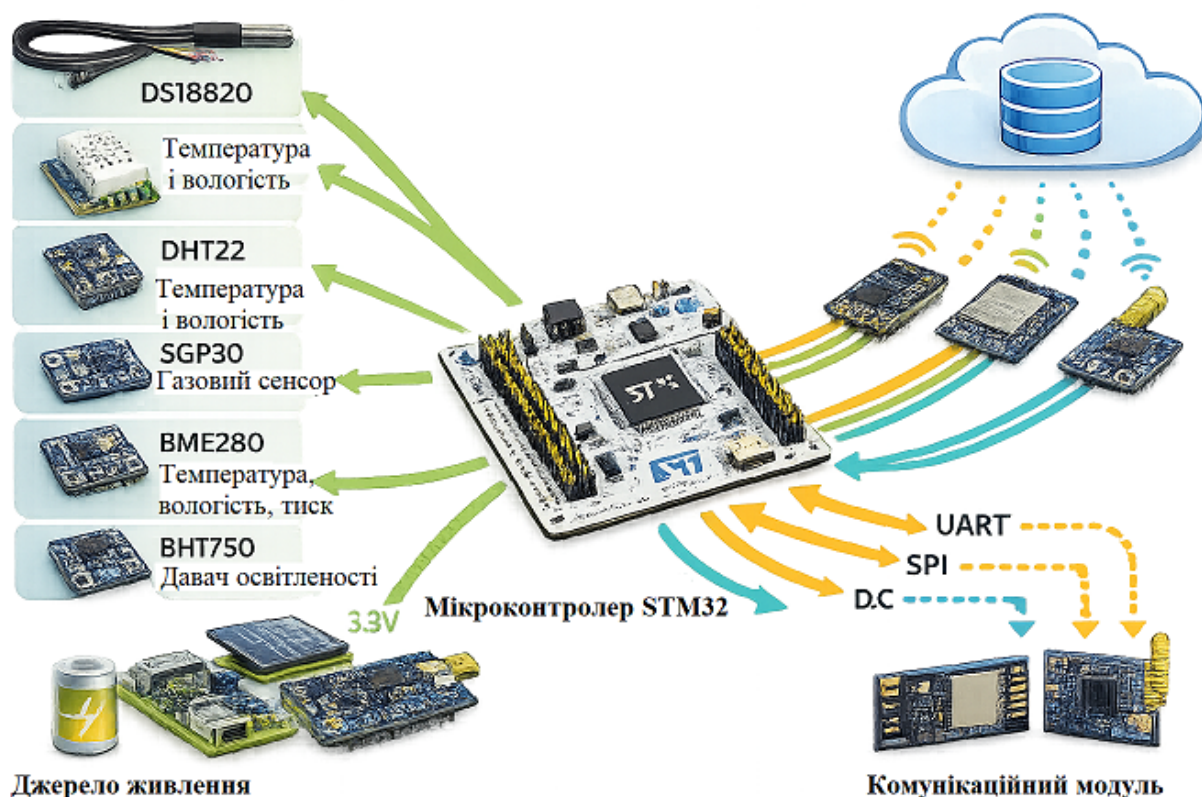


Рисунок 1.7 – Типова структура вузла збору сенсорних даних на базі STM32L432KC [15]

Одним із найбільш поширених сенсорів температури є цифровий датчик DS18B20. Його перевагою є висока точність вимірювання, підтримка інтерфейсу One-Wire та можливість підключення декількох датчиків до однієї сигнальної лінії. Завдяки цьому він широко використовується у системах моніторингу температури та автоматизованого керування [16].

Для вимірювання температури та відносної вологості повітря часто використовуються датчики DHT22. Вони забезпечують достатню точність вимірювань при невисокій вартості та простоті інтеграції з мікроконтролерними системами. Такі сенсори широко застосовуються у системах кліматичного

контролю, метеостанціях та системах «розумного будинку».

Іншим поширеним рішенням є використання сенсорів сімейства Bosch BME280. Вони дозволяють одночасно вимірювати температуру, вологість та атмосферний тиск, що значно розширює функціональні можливості пристрою. Завдяки високій інтеграції та низькому енергоспоживанню BME280 активно використовується в автономних IoT-пристроях.

У таблиці 1.4 наведено найбільш поширені цифрові сенсори, які можуть використовуватись у складі вузла збору даних. Найбільш функціональним рішенням є BME280, який забезпечує вимірювання трьох параметрів одночасно.

Таблиця 1.4 – Порівняльна характеристика поширених сенсорів

Сенсор	Вимірювані параметри	Інтерфейс	Переваги
DS18B20	Температура	One-Wire	Висока точність, просте підключення
DHT22	Температура, вологість	Digital GPIO	Низька вартість
BME280	Температура, вологість, тиск	I2C, SPI	Багатофункціональність
BMP280	Температура, тиск	I2C, SPI	Низьке енергоспоживання

Важливим елементом будь-якої сенсорної системи є інтерфейси обміну даними між сенсорами та мікроконтролером. У сучасних пристроях найбільш поширеними є інтерфейси UART, SPI та I2C.

Інтерфейс UART використовується для послідовного передавання даних між двома пристроями. Його перевагою є простота реалізації та мінімальна кількість сигнальних ліній. UART часто використовується для підключення модулів бездротового зв'язку та налагодження роботи пристрою.

Інтерфейс SPI забезпечує високошвидкісний обмін інформацією між мікроконтролером і периферійними пристроями. Завдяки високій пропускну здатності він широко застосовується для підключення карт пам'яті, дисплеїв та сенсорів із великим обсягом переданих даних.

У таблиці 1.5 наведено основні характеристики найбільш поширених інтерфейсів обміну даними, які використовуються у мікроконтролерних системах на базі STM32L432KC.

Таблиця 1.5 – Порівняльна характеристика інтерфейсів UART, SPI та I²C

Характеристика	UART	SPI	I ² C
Тип інтерфейсу	Асинхронний	Синхронний	Синхронний
Кількість основних сигнальних ліній	2 (TX, RX)	4 (MOSI, MISO, SCK, SS)	2 (SDA, SCL)
Підключення декількох пристроїв	Обмежене	Підтримується через окремі лінії вибору	Підтримується через адресацію
Швидкість передавання даних	До декількох Мбіт/с	До десятків Мбіт/с	До 3,4 Мбіт/с
Складність реалізації	Низька	Середня	Низька
Довжина лінії зв'язку	Середня	Невелика	Невелика
Типові пристрої	GPS-модулі, Bluetooth, Wi-Fi	Дисплеї, карти пам'яті, швидкі сенсори	Датчики температури, вологості, тиску
Переваги	Простота реалізації	Висока швидкість обміну	Мінімальна кількість ліній
Недоліки	Не підтримує адресацію пристроїв	Більша кількість з'єднань	Нижча порівняно зі SPI

Інтерфейс I²C дозволяє підключати декілька пристроїв до спільної двопровідної шини. Саме тому більшість сучасних цифрових сенсорів використовують I²C як основний інтерфейс обміну даними.

Інтерфейс UART відзначається простотою реалізації та широко застосовується для підключення модулів зв'язку. SPI забезпечує найвищу

швидкість передавання даних і використовується для взаємодії з периферійними пристроями, що потребують швидкого обміну інформацією. I²C характеризується мінімальною кількістю сигнальних ліній і підтримкою підключення декількох пристроїв до спільної шини, що робить його найбільш популярним для роботи з цифровими сенсорами у вбудованих системах.

Під час проєктування вузла збору даних особливу увагу слід приділяти сумісності сенсорів із мікроконтролером та рівню їх енергоспоживання. Використання цифрових сенсорів із підтримкою режимів низького енергоспоживання дозволяє суттєво збільшити автономність роботи системи та підвищити її загальну енергоефективність.

Таким чином, аналіз сучасних сенсорів та інтерфейсів передавання даних показує, що для реалізації енергоефективного вузла збору сенсорної інформації доцільно використовувати цифрові датчики сімейств DS18B20, DHT22 або BME280 у поєднанні з інтерфейсами I²C, SPI та UART. Такий підхід забезпечує високу точність вимірювань, надійність передавання даних та простоту інтеграції з мікроконтролерами STM32L432KC.

РОЗДІЛ 2

СХЕМНЕ ПРОЄКТУВАННЯ ТА ПРИНЦИП РОБОТИ ПРИСТРОЮ

2.1 Розробка структурної та функціональної схеми системи

Після проведення аналізу сучасних вбудованих систем збору сенсорних даних та обґрунтування вибору мікроконтролерної платформи STM32L432KC доцільним є розроблення структури проєктованого пристрою. Основною функцією вузла збору сенсорних даних є отримання інформації від сенсорів, її попередня обробка, формування інформаційних пакетів та передавання результатів до зовнішніх інформаційних систем для подальшого зберігання й аналізу [1], [2].

При проєктуванні структури пристрою необхідно забезпечити виконання низки вимог, серед яких основними є висока надійність роботи, низьке енергоспоживання, можливість автономного функціонування, підтримка сучасних цифрових інтерфейсів та інтеграція із системами Інтернету речей. Крім того, структура повинна забезпечувати можливість подальшої модернізації та підключення додаткових сенсорних модулів без суттєвого ускладнення апаратної частини [1], [4].

На основі сформульованих вимог було розроблено структурну схему вузла збору сенсорних даних, яка наведена на рисунку 2.1.

На рисунку доцільно показати взаємодію джерела живлення, сенсорного блоку, мікроконтролера STM32, комунікаційного модуля та хмарної платформи. Структурна схема відображає загальну архітектуру пристрою та напрямки передавання інформації між його основними вузлами.

До складу розроблюваної системи входять такі функціональні блоки:

- блок живлення;
- блок сенсорів;
- мікроконтролер STM32L432KC;
- комунікаційний модуль;
- сервер зберігання та обробки даних.

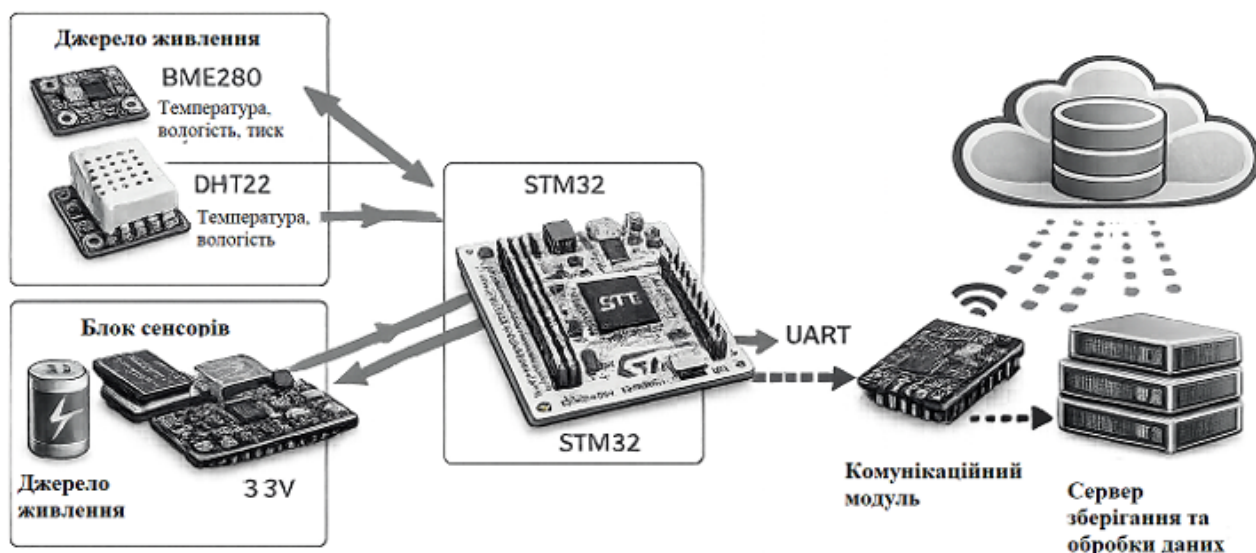


Рисунок 2.1 – Структурна схема енергоефективного вузла збору сенсорних даних на базі STM32L432KC [4]

Центральним елементом системи є мікроконтролер STM32, який виконує функції координації роботи всіх апаратних модулів пристрою. Саме він забезпечує зчитування інформації із сенсорів, виконання необхідних обчислень, підготовку даних до передавання та керування режимами енергоспоживання [2], [3].

Для отримання інформації про стан навколишнього середовища у складі пристрою передбачено використання цифрових сенсорів. Основним сенсором системи обрано BME280, який забезпечує вимірювання температури, відносної вологості повітря та атмосферного тиску [6]. Застосування одного інтегрованого сенсора дозволяє зменшити кількість компонентів системи та скоротити енергоспоживання порівняно з використанням декількох окремих датчиків.

Для підвищення достовірності результатів вимірювання та розширення функціональних можливостей вузла передбачається можливість підключення додаткових цифрових сенсорів через інтерфейси I²C, SPI або UART. Такий підхід забезпечує гнучкість структури та дозволяє адаптувати систему до різних умов застосування [15], [16].

Особливу роль у структурі пристрою відіграє блок комунікації. Для реалізації функцій дистанційного моніторингу доцільно використовувати

бездротовий модуль Wi-Fi на базі ESP8266 або ESP32. Даний модуль забезпечує передачу інформації через локальну мережу або Інтернет до віддаленого сервера чи хмарної платформи [13].

Важливою складовою структури є блок живлення. Його основним завданням є забезпечення стабільної напруги живлення всіх вузлів системи. З огляду на вимоги енергоефективності доцільно використовувати високоефективний стабілізатор напруги з низьким власним споживанням струму. Крім того, передбачається можливість живлення пристрою від акумуляторної батареї або автономного джерела енергії [4], [5].

Для кращого розуміння призначення окремих вузлів системи узагальнимо їх основні функції в таблиці 2.1.

Таблиця 2.1 – Основні функціональні блоки вузла збору сенсорних даних

Блок системи	Основне призначення
Сенсор BME280	Вимірювання температури, вологості та атмосферного тиску
STM32L432KC	Обробка даних та керування системою
Комунікаційний модуль	Передавання даних до мережі
Блок живлення	Забезпечення електроживлення вузлів
Хмарна платформа	Зберігання та аналіз отриманої інформації

У таблиці наведено основні складові проєктованого пристрою та їх функціональне призначення. Сукупність зазначених блоків формує завершену систему збору та передавання сенсорної інформації.

На основі структурної схеми формується функціональна схема системи, яка деталізує послідовність проходження інформації між окремими вузлами пристрою.

На рисунку 2.2 доцільно показати процес проходження інформації від сенсорів до мікроконтролера STM32L432KC, її обробку, формування пакета даних та подальшу передачу через комунікаційний модуль до хмарної платформи.

Принцип функціонування системи полягає у циклічному виконанні послідовності операцій. Після подачі живлення виконується ініціалізація мікроконтролера та периферійних модулів. Далі STM32L432KC здійснює опитування сенсорів і отримує результати вимірювань.

Отримані значення проходять перевірку коректності та первинну обробку. Після цього формується пакет телеметричних даних, який передається до комунікаційного модуля для подальшого надсилання через мережу [1], [13].

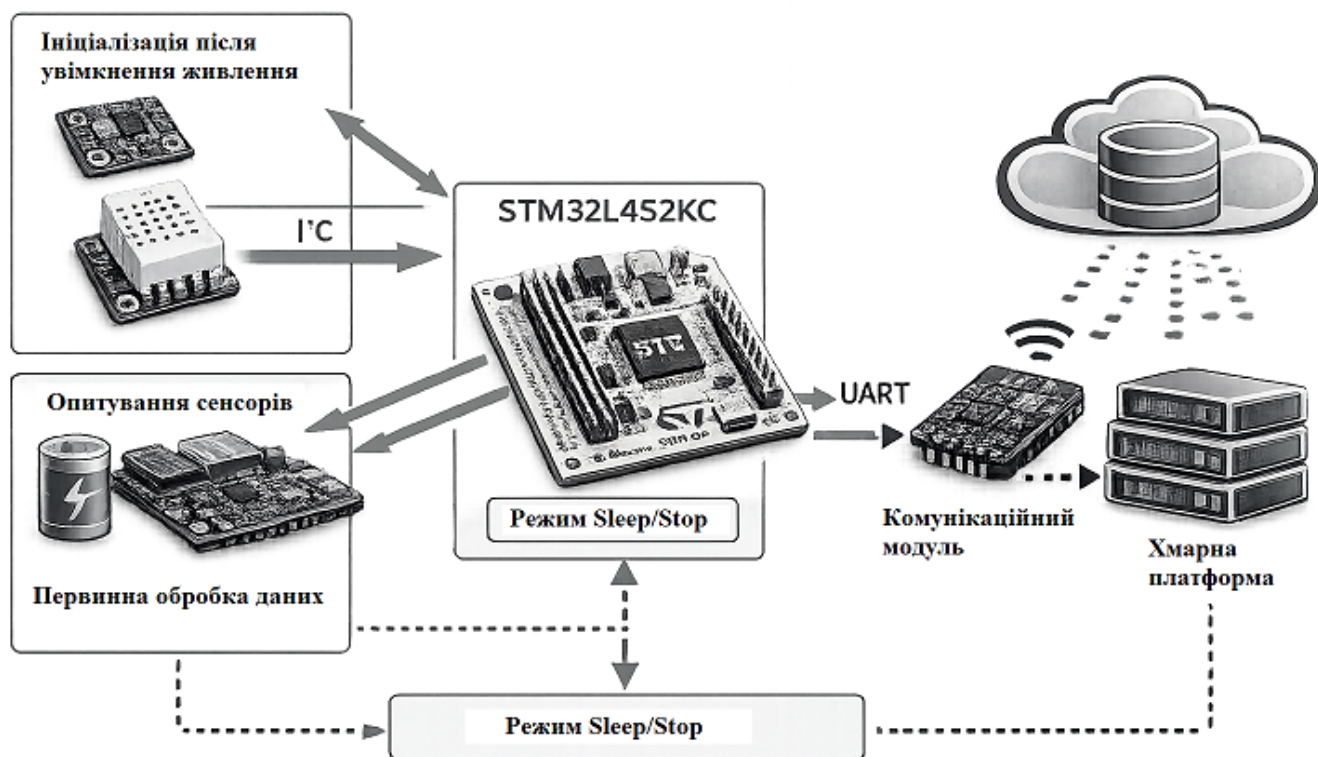


Рисунок 2.2 – Функціональна схема вузла збору сенсорних даних

Для забезпечення енергоефективності більшу частину часу система перебуває у режимі пониженого енергоспоживання. Активізація роботи відбувається лише в момент проведення вимірювань та передачі даних. Після завершення циклу вимірювання мікроконтролер переходить у режим Sleep або Stop, що дозволяє значно зменшити середнє споживання енергії [4], [5].

Схема інформаційної взаємодії між основними блоками системи наведена у таблиці 2.2.

Таблиця 2.2 – Інформаційна взаємодія функціональних вузлів системи

Джерело інформації	Приймач інформації	Інтерфейс
BME280	STM32L432KC	I ² C
Додаткові сенсори	STM32L432KC	I ² C / SPI / UART
STM32L432KC	Комунікаційний модуль	UART
Комунікаційний модуль	Хмарна платформа	Wi-Fi
Хмарна платформа	База даних	TCP/IP

Таблиця відображає основні канали передавання інформації між вузлами системи. Використання стандартних інтерфейсів забезпечує сумісність пристрою з широким спектром периферійних модулів та сенсорів.

Розроблена структурна та функціональна схеми враховують сучасні вимоги до побудови енергоефективних сенсорних вузлів. Використання STM32L432KC забезпечує достатню продуктивність для виконання алгоритмів збору та обробки інформації, а застосування цифрових сенсорів дозволяє отримувати точні вимірювання при мінімальних енергетичних витратах. Завдяки використанню бездротового зв'язку система може інтегруватися з існуючими IoT-платформами та забезпечувати віддалений моніторинг параметрів об'єкта в режимі реального часу [1], [6], [13].

2.2 Вибір елементної бази та розробка принципової електричної схеми

Після визначення структурної та функціональної організації вузла збору сенсорних даних необхідно перейти до вибору елементної бази, яка забезпечує практичну реалізацію пристрою. У даному підрозділі розглядаються основні апаратні компоненти системи: мікроконтролер, сенсорний модуль, комунікаційний модуль, вузол живлення та допоміжні елементи схеми.

Основними вимогами до елементної бази є низьке енергоспоживання, сумісність за рівнями напруг, підтримка цифрових інтерфейсів, надійність роботи та можливість подальшого розширення системи. Оскільки пристрій

призначений для збору сенсорних даних і може працювати автономно, особливу увагу приділено вибору компонентів із підтримкою енергоощадних режимів роботи [1], [4], [5].

Як центральний елемент системи доцільно використати мікроконтролер STM32L432KC, який належить до енергоефективної серії STM32L4. Дана серія орієнтована на застосування у вбудованих системах із низьким енергоспоживанням, автономних пристроях, сенсорних вузлах та IoT-рішеннях [1], [2]. Мікроконтролер STM32L432KC забезпечує достатню продуктивність для опитування сенсорів, первинної обробки даних, формування інформаційних пакетів і керування комунікаційним модулем.

Перевагою STM32L432KC є поєднання ядра ARM Cortex-M4, розвиненої периферії та режимів зниженого енергоспоживання. Це дозволяє використовувати мікроконтролер не лише для простого зчитування даних, а й для реалізації алгоритмів попередньої обробки, перевірки коректності вимірювань і керування режимами живлення системи [4], [5].

У таблиці 2.3 наведено ті периферійні модулі STM32L432KC, які мають практичне значення для реалізації енергоефективного вузла збору сенсорних даних. Найважливішими для даної системи є інтерфейси I²C та UART, оскільки через них здійснюється взаємодія відповідно із сенсорним модулем і модулем бездротового зв'язку. Використання DMA, таймерів і RTC дозволяє зменшити участь центрального ядра в допоміжних операціях і підвищити енергоефективність роботи пристрою [4], [5].

Для вимірювання параметрів навколишнього середовища в системі доцільно використати цифровий сенсор BME280. Він забезпечує вимірювання температури, відносної вологості та атмосферного тиску, що дозволяє отримувати кілька параметрів за допомогою одного компактного модуля [6].

Застосування BME280 спрощує принципову схему, зменшує кількість з'єднань і підвищує надійність апаратної частини.

Підключення BME280 до STM32L432KC доцільно реалізувати через інтерфейс I²C. Такий варіант є зручним для сенсорних систем, оскільки потребує

Таблиця 2.3 – Основні периферійні модулі мікроконтролера STM32

Модуль	Основні характеристики	Призначення у проєктованій системі
ARM Cortex-M4	32-бітне ядро з достатньою продуктивністю для задач збору даних	Виконання програми керування, обробка сенсорної інформації
Flash-пам'ять	Енергонезалежна пам'ять програм	Зберігання програмного коду
SRAM	Оперативна пам'ять	Зберігання змінних, буферів і пакетів даних
I ² C	Двопровідний цифровий інтерфейс	Підключення сенсора BME280
SPI	Синхронний високошвидкісний інтерфейс	Підключення додаткових периферійних модулів
UART	Асинхронний послідовний інтерфейс	Обмін даними з Wi-Fi-модулем ESP8266 або ESP32
ADC	Аналого-цифровий перетворювач	Можливе підключення аналогових сенсорів
DMA	Контролер прямого доступу до пам'яті	Зменшення навантаження на процесор під час передавання даних
Таймери	Формування часових інтервалів	Організація періодичного опитування сенсорів
RTC	Годинник реального часу	Періодичне пробудження системи з режиму енергозбереження
GPIO	Лінії введення-виведення	Підключення керуючих і сервісних сигналів

лише двох сигнальних ліній: SDA для передавання даних і SCL для тактування.

На лініях I²C необхідно передбачити підтягувальні резистори до напруги живлення 3,3 В. Номінал таких резисторів у типових схемах становить 4,7 кОм, однак остаточне значення може уточнюватися з урахуванням довжини ліній і кількості підключених пристроїв [6], [15].

Як додатковий сенсор може використовуватися DHT22, який забезпечує вимірювання температури та відносної вологості. Його доцільно застосовувати у випадках, коли потрібно виконати порівняння результатів або забезпечити резервний канал вимірювання температурно-вологісних параметрів [9]. Однак основним сенсором системи доцільно залишити BME280, оскільки він має ширші функціональні можливості та підтримує стандартні цифрові інтерфейси.

Для передавання результатів вимірювання до зовнішньої інформаційної системи використовується комунікаційний модуль Wi-Fi. У межах даної роботи доцільно передбачити застосування ESP8266 або ESP32. Обидва модулі дозволяють реалізувати бездротову передачу даних до локального сервера або хмарної платформи. З огляду на простоту підключення до STM32L432KC, обмін між мікроконтролером і Wi-Fi-модулем доцільно організувати через інтерфейс UART [13].

Передача даних через UART не потребує складної апаратної реалізації та використовує мінімальну кількість сигнальних ліній. Для взаємодії STM32L432KC з ESP8266 достатньо використати лінії TX, RX, GND та живлення 3,3 В. При цьому важливо забезпечити стабільне живлення Wi-Fi-модуля, оскільки під час передавання даних він може створювати короткочасні піки споживання струму. Тому в схемі необхідно передбачити фільтрувальні конденсатори поблизу модуля зв'язку [10], [13].

Вузол живлення є важливою частиною принципової електричної схеми, оскільки від його стабільності залежить правильність вимірювання сенсорів, робота мікроконтролера та надійність передавання даних. Для живлення системи доцільно використовувати акумуляторне джерело з подальшою стабілізацією напруги до рівня 3,3 В. Такий рівень напруги є сумісним із STM32L432KC,

BME280 та більшістю Wi-Fi-модулів [2], [6], [13].

У схемі живлення необхідно передбачити згладжувальні та блокувальні конденсатори. Конденсатори малої ємності, наприклад 100 нФ, розміщуються поблизу виводів живлення мікроконтролера та сенсорів для придушення високочастотних завад. Конденсатори більшої ємності, наприклад 10 мкФ або більше, доцільно застосовувати для стабілізації напруги під час короткочасних змін струму навантаження [10], [11].

У таблиці 2.4 наведено основні компоненти, які доцільно використати у складі принципової електричної схеми пристрою. Обрані елементи забезпечують виконання функцій збору, первинної обробки, передавання даних і стабілізації живлення. Такий склад елементної бази є достатнім для реалізації енергоефективного вузла збору сенсорних даних на базі STM32L432KC.

На основі вибраних компонентів розробляється принципова електрична схема пристрою. Її основою є мікроконтролер STM32L432KC, до якого підключаються сенсорний модуль BME280, додатковий сенсор DHT22, Wi-Fi-модуль ESP8266 або ESP32, вузол живлення та роз'єм для програмування.

Підключення BME280 реалізується через шину I²C. Лінія SDA підключається до відповідного виводу I²C мікроконтролера, а лінія SCL – до тактової лінії цього самого інтерфейсу. Обидві лінії підтягуються до напруги 3,3 В через резистори. Такий спосіб підключення дозволяє за потреби додавати інші I²C-сенсори без істотної зміни принципової схеми [6], [15].

Підключення DHT22 здійснюється через цифрову лінію GPIO. Для коректного формування логічного рівня на сигнальній лінії доцільно використовувати підтягувальний резистор. Оскільки DHT22 має нижчу швидкість обміну порівняно з I²C-сенсорами, його доцільно використовувати як додатковий або резервний вимірювальний елемент [9]. Wi-Fi-модуль ESP8266 або ESP32 підключається до STM32L432KC через UART. Лінія TX мікроконтролера з'єднується з RX модуля, а RX мікроконтролера – з TX модуля.

Спільна лінія GND є обов'язковою для коректного обміну сигналами. Для забезпечення стабільності роботи модуля зв'язку в схемі доцільно встановити

додатковий конденсатор по живленню біля його виводів [13].

Таблиця 2.4 – Основні елементи проєктованого вузла збору сенсорних даних

Елемент	Призначення	Обґрунтування вибору
STM32L432KC	Центральний мікроконтролер	Низьке енергоспоживання, підтримка I ² C, SPI, UART, ADC, DMA
BME280	Вимірювання температури, вологості та тиску	Один сенсор забезпечує вимірювання трьох параметрів
DHT22	Додатковий сенсор температури та вологості	Може використовуватися для резервного або порівняльного вимірювання
ESP8266/ESP32	Передавання даних через Wi-Fi	Забезпечує інтеграцію з IoT-платформами
Стабілізатор 3,3 В	Формування стабільної напруги живлення	Забезпечує сумісність усіх основних вузлів
Конденсатори 100 нФ	Локальна фільтрація живлення	Зменшення високочастотних завад
Конденсатори 10 мкФ і більше	Згладжування пульсацій живлення	Підтримка стабільної роботи під час зміни струму
Резистори 4,7 кОм	Підтягування ліній I ² C	Забезпечення коректної роботи шини SDA/SCL
SWD-роз'єм	Програмування та налагодження	Підключення програматора ST-Link

Для програмування та налагодження STM32L432KC використовується інтерфейс SWD. У принциповій схемі необхідно передбачити виводи SWDIO, SWCLK, GND та 3,3 В. Це дозволяє підключати програматор ST-Link, завантажувати програмне забезпечення та виконувати налагодження роботи

пристрою в середовищі STM32CubeIDE [1], [8].

Розглянемо принципову електричну схему вузла збору сенсорних даних на базі STM32L432KC, розроблену за допомогою програми EasyEDA на рисунку 2.3.

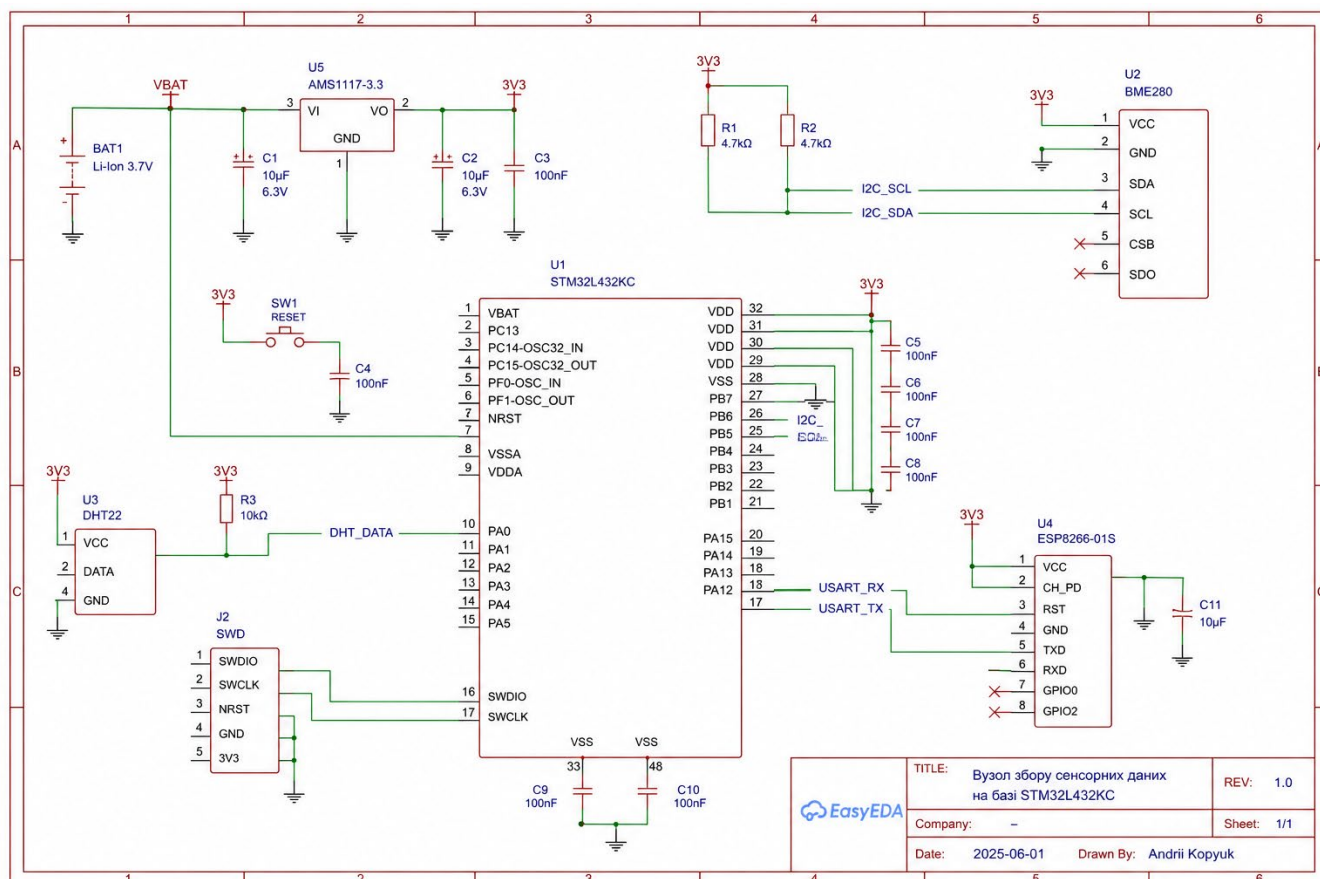


Рисунок 2.3 – Принципова електрична схема вузла збору сенсорних даних на базі STM32L432KC

На рисунку доцільно подати з'єднання між STM32L432KC, сенсором BME280, додатковим сенсором DHT22, Wi-Fi-модулем ESP8266 або ESP32, стабілізатором 3,3 В, фільтрувальними конденсаторами та SWD-роз'ємом програмування. Схема повинна показувати не загальну структуру системи, а саме електричні з'єднання між елементами.

Під час розробки принципової електричної схеми необхідно враховувати вимоги до розміщення елементів. Фільтрувальні конденсатори слід розташовувати якомога ближче до виводів живлення мікроконтролера, сенсорів і Wi-Fi-модуля. Лінії I²C бажано робити короткими, щоб зменшити вплив

паразитної ємності та електромагнітних завад. Лінії UART між STM32L432KC та Wi-Fi-модулем також доцільно прокладати без зайвих перехрещень із силовими лініями.

Окрему увагу слід приділити спільній шині землі. Усі вузли системи повинні мати спільний потенціал GND. Наявність якісного заземлення зменшує рівень шумів, підвищує стабільність вимірювань і забезпечує коректну роботу цифрових інтерфейсів.

Таким чином, вибрана елементна база забезпечує реалізацію основних функцій пристрою: зчитування сенсорних даних, їх первинну обробку, формування інформаційних пакетів і передавання результатів через Wi-Fi. Використання STM32L432KC, BME280 та ESP8266 або ESP32 дозволяє створити компактний, енергоефективний і масштабований вузол збору сенсорних даних, придатний для інтеграції в IoT-системи [1], [4], [6], [13]. Розглянуто принципи підключення сенсорів, модуля зв'язку, вузла живлення та інтерфейсу програмування. Запропонована елементна база є основою для подальшої організації взаємодії сенсорів та інтерфейсів передачі даних.

2.3 Організація взаємодії сенсорів та інтерфейсів передачі даних

Ефективність роботи вузла збору сенсорних даних значною мірою залежить від правильної організації інформаційного обміну між його функціональними компонентами. У розроблюваній системі взаємодія між сенсорними модулями, мікроконтролером та засобами бездротового зв'язку реалізується на основі циклічного виконання операцій збору, обробки та передачі інформації. Такий підхід широко використовується в сучасних вбудованих IoT-пристроях, оскільки дозволяє забезпечити необхідну функціональність при мінімальному рівні енергоспоживання [4], [10].

Після подачі живлення мікроконтролер STM32L432KC виконує ініціалізацію периферійних модулів та налаштування каналів інформаційного обміну. На цьому етапі активуються необхідні апаратні ресурси, конфігуруються

параметри внутрішніх таймерів і формуються умови для подальшого циклічного виконання вимірювань [1], [8].

Особливістю функціонування системи є періодичний характер збору інформації. Через задані проміжки часу мікроконтролер активує сенсорні модулі та виконує процедуру отримання результатів вимірювань. Отримані значення зберігаються у внутрішній пам'яті пристрою та проходять первинну перевірку на коректність. Такий підхід дозволяє своєчасно виявляти помилки вимірювання та підвищує надійність функціонування системи в цілому [6], [11].

Після завершення циклу вимірювання виконується формування інформаційного пакета. До його складу входять результати вимірювань, службові параметри та допоміжна інформація, необхідна для подальшого аналізу даних. Попередня підготовка пакета безпосередньо на рівні мікроконтролера відповідає концепції локальної обробки даних, яка дозволяє зменшити навантаження на канал зв'язку та скоротити енергетичні витрати системи [13], [14].

Передача сформованих пакетів здійснюється через комунікаційний модуль Wi-Fi. Після отримання інформації модуль встановлює мережеве з'єднання та забезпечує надсилання даних до віддаленого сервера або хмарної платформи. Використання бездротового каналу зв'язку дозволяє реалізувати функції дистанційного моніторингу та інтегрувати пристрій до сучасних IoT-систем [2], [13].

Для підвищення автономності роботи використовується циклічний режим функціонування. Більшу частину часу система перебуває у стані пониженого енергоспоживання, а активний режим використовується лише під час виконання вимірювань та передачі інформації. Така організація роботи дозволяє суттєво знизити середнє енергоспоживання пристрою та збільшити тривалість його автономного функціонування [4], [9], [12].

Для наочного відображення процесу інформаційної взаємодії між функціональними вузлами системи доцільно подати рисунок 2.4.

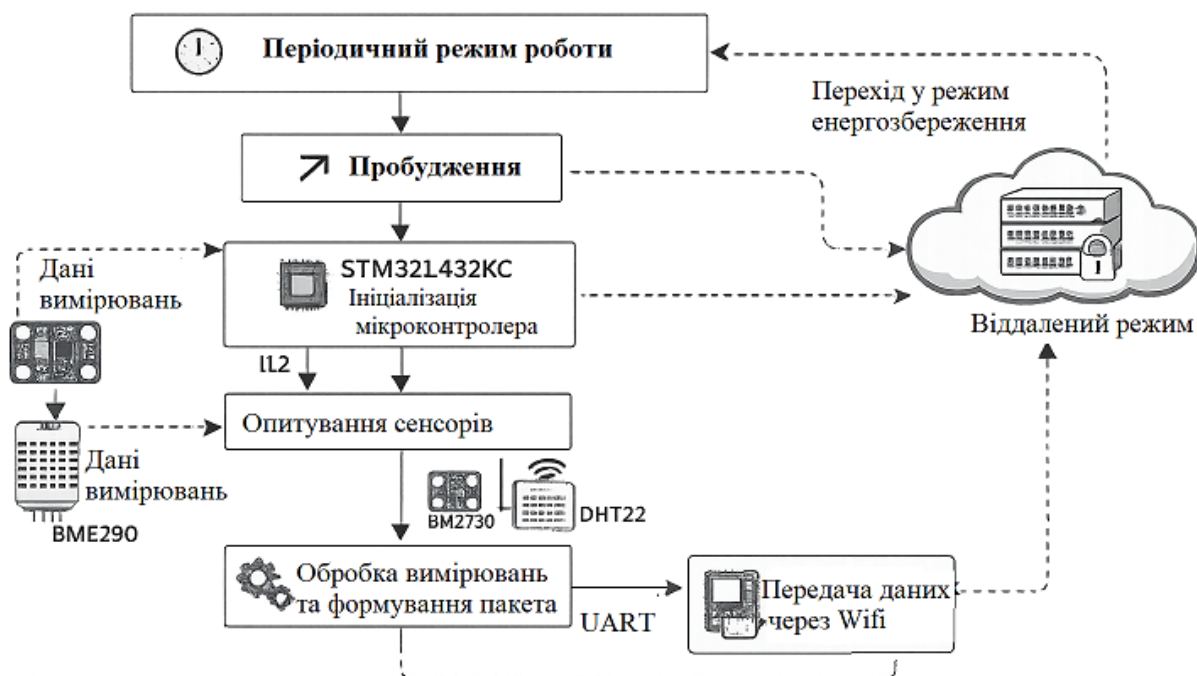


Рисунок 2.4 – Організація інформаційного обміну у вузлі збору сенсорних даних [9]

На рисунку показано послідовність проходження інформації від сенсорних модулів через мікроконтролер STM32L432KC до комунікаційного модуля та віддаленої хмарної платформи. Особливу увагу слід приділити етапам локальної обробки даних та режимам енергозбереження, що забезпечують підвищення автономності роботи пристрою.

Таким чином, запропонована організація взаємодії забезпечує ефективне функціонування вузла збору сенсорних даних, підтримує енергоощадні режими роботи та створює умови для інтеграції пристрою в сучасні інформаційно-комунікаційні системи. Використання локальної обробки інформації та циклічного режиму роботи дозволяє досягти високої енергоефективності без погіршення якості моніторингу параметрів навколишнього середовища [4], [10], [14].

2.4 Алгоритм роботи енергоефективного вузла збору сенсорних даних

Алгоритм роботи проєктованого вузла збору сенсорних даних визначає

послідовність виконання операцій вимірювання, обробки та передавання інформації з урахуванням вимог до енергоефективності системи. Основною особливістю алгоритму є мінімізація часу перебування мікроконтролера та комунікаційного модуля в активному режимі, що дозволяє суттєво знизити середнє енергоспоживання пристрою [4], [9].

Після подачі живлення або виходу із режиму енергозбереження мікроконтролер STM32L432KC виконує ініціалізацію тактової системи, портів вводу-виводу та периферійних інтерфейсів, необхідних для роботи сенсорів і модуля зв'язку [1], [8]. Далі здійснюється опитування датчиків BME280 та DHT22 і приймання результатів вимірювання температури, вологості та атмосферного тиску [6], [16].

Отримані дані проходять перевірку коректності та попередню програмну обробку. На цьому етапі можуть виконуватись усереднення результатів, фільтрація випадкових відхилень та формування єдиного пакета телеметричної інформації. Такий підхід дозволяє підвищити достовірність вимірювань і скоротити кількість повідомлень, що передаються через мережу [10], [13].

Після формування пакета даних активується Wi-Fi-модуль ESP8266 або ESP32, через який інформація передається на віддалений сервер або хмарну платформу для подальшого зберігання та аналізу [13]. Після підтвердження успішної передачі даних комунікаційний модуль переводиться у режим очікування.

Для забезпечення енергоефективності після завершення циклу вимірювання мікроконтролер переходить у режим Sleep або Stop. Пробудження системи здійснюється за сигналом таймера RTC через заданий інтервал часу [4], [5], [9]. Така організація роботи дозволяє зменшити середній струм споживання та збільшити тривалість автономного функціонування пристрою.

Для наочного представлення послідовності виконання основних операцій розроблено блок-схему алгоритму роботи енергоефективного вузла збору сенсорних даних, яка наведена на рисунку 2.5.

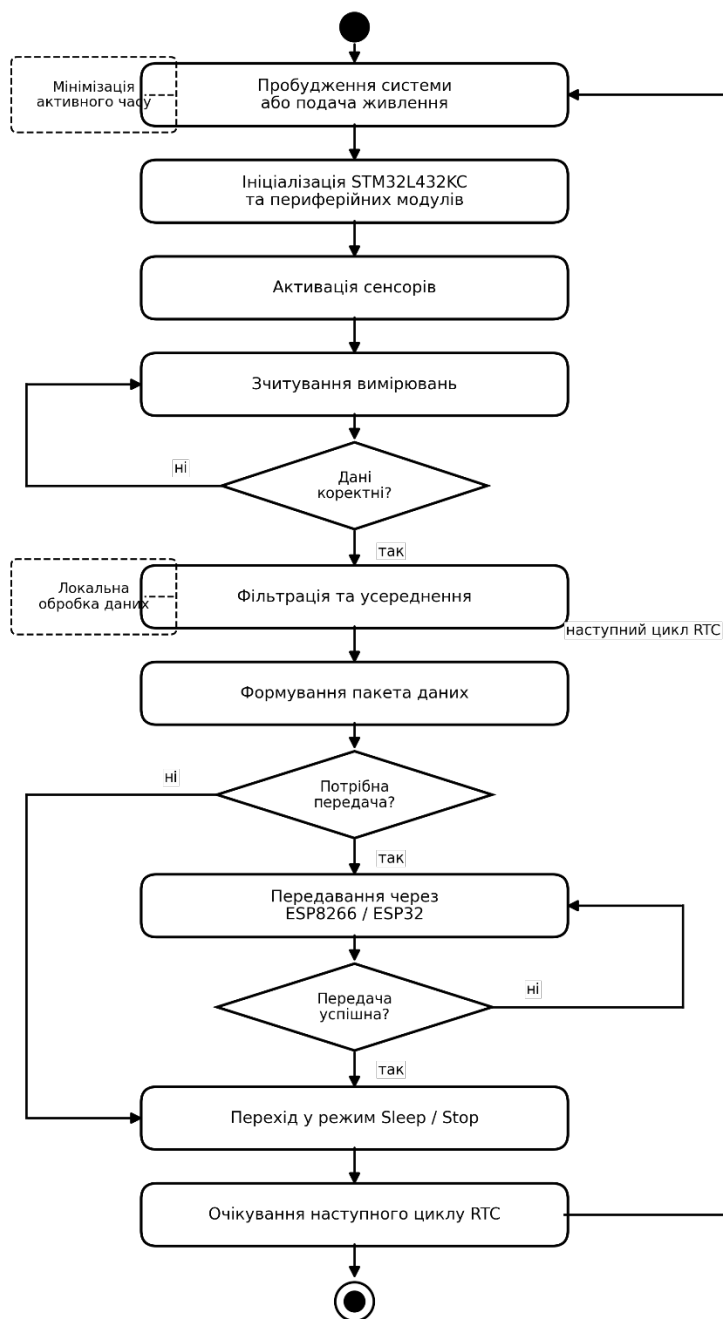


Рисунок 2.5 – Блок-схема алгоритму роботи енергоефективного вузла збору сенсорних даних

Блок-схема демонструє циклічний принцип роботи системи. Після пробудження або подачі живлення виконується ініціалізація мікроконтролера та периферійних модулів, зчитування даних із сенсорів, перевірка коректності вимірювань, формування телеметричного пакета та його передавання через бездротовий канал зв'язку. Після завершення передачі система переходить у

режим Sleep або Stop і очікує наступного циклу вимірювання.

Отже, запропонований алгоритм забезпечує періодичний збір сенсорних даних, їх локальну обробку, передачу до інформаційної системи та використання режимів енергозбереження. Це дозволяє реалізувати енергоефективний вузол збору даних, придатний для використання у складі сучасних IoT-систем моніторингу [4], [10], [13].

РОЗДІЛ 3

РОЗРАХУНКОВА АПАРАТНО-ПРОГРАМНА ЧАСТИНА

3.1 Розрахунок енергоспоживання та джерела живлення системи

Для забезпечення тривалої автономної роботи вузла збору сенсорних даних на базі STM32L432KC необхідно виконати оцінку енергоспоживання основних апаратних компонентів системи та обґрунтувати вибір джерела живлення. До складу проєктованого пристрою входять мікроконтролер STM32L432KC, сенсор BME280, додатковий сенсор DHT22, Wi-Fi модуль ESP8266 (або ESP32) та вузол стабілізації напруги [1], [4], [5], [13].

Під час роботи система функціонує циклічно. Основну частину часу мікроконтролер перебуває у режимі зниженого енергоспоживання Stop, а активний режим використовується лише для зчитування даних із сенсорів та передавання інформації через бездротовий канал. Такий підхід дозволяє суттєво зменшити середнє споживання струму та збільшити тривалість автономної роботи пристрою [4], [5].

Для орієнтовного розрахунку приймемо такі значення споживання струму: STM32L432KC в активному режимі – 5 мА; BME280 – 0,7 мА під час вимірювання; DHT22 – 1,5 мА під час опитування; ESP8266 – до 80 мА під час передавання даних. Сумарний струм у активному режимі становить:

$$I_{\text{акт}} = 5 + 0,7 + 1,5 + 80 = 87,2 \text{ мА.}$$

Тривалість одного циклу вимірювання приймається 5 с, при цьому активний режим займає приблизно 0,5 с, а решту часу система перебуває у режимі Stop. Для STM32L432KC струм у режимі Stop можна прийняти на рівні 2 мкА, а споживання сенсорів у режимі очікування є незначним [4], [5].

Середній струм споживання визначається за співвідношенням (3.1):

$$I_{\text{ср}} = (I_{\text{акт}} \cdot t_{\text{акт}} + I_{\text{сон}} \cdot t_{\text{сон}}) / T, \quad (3.1)$$

де T – тривалість повного циклу роботи.

Підставляючи прийняті значення отримаємо:

$$I_{сер} = (87,2 \cdot 0,5 + 0,002 \cdot 4,5) / 5 \approx 8,72 \text{ мА.}$$

Споживана потужність системи при напрузі живлення 3,3 В становить:

$$P = U \cdot I_{сер} = 3,3 \cdot 0,00872 \approx 0,029 \text{ Вт.}$$

Отримане значення підтверджує можливість створення енергоефективного сенсорного вузла, придатного для автономного використання у складі IoT-систем [1], [4].

Для живлення пристрою доцільно використати Li-Ion акумулятор номінальною напругою 3,7 В та ємністю 2000 мА·год. Стабілізація напруги до рівня 3,3 В здійснюється за допомогою стабілізатора LD1117S33 або аналогічного елемента [10], [11].

Орієнтовний час автономної роботи визначається за формулою (3.2):

$$t = C / I_{сер}, \quad (3.2)$$

де C – ємність акумулятора.

Для акумулятора 2000 мА·год:

$$t = 2000 / 8,72 \approx 229 \text{ год} \approx 9,5 \text{ доби.}$$

За додаткової оптимізації алгоритму роботи, зменшення частоти передавання даних та використання глибших режимів енергозбереження тривалість автономної роботи може бути суттєво збільшена [4], [5], [13].

Для підвищення стабільності роботи вузла живлення в схемі необхідно передбачити блокувальні конденсатори 100 нФ біля виводів живлення мікроконтролера та сенсорів, а також електролітичні конденсатори 10 мкФ у вузлі стабілізації напруги. Такі елементи забезпечують зменшення пульсацій напруги та компенсацію короткочасних піків споживання струму Wi-Fi модуля [10], [11].

Таким чином, виконаний розрахунок показав, що використання

STM32L432KC у поєднанні з режимами низького енергоспоживання, сенсором BME280 та бездротовим модулем ESP8266 дозволяє реалізувати енергоефективний вузол збору сенсорних даних із можливістю автономної роботи від акумуляторного джерела живлення. Отримані результати є достатніми для подальшого розроблення програмного забезпечення та оцінки ефективності режимів енергозбереження

3.2 Вибір режимів енергозбереження STM32 та оцінка їх ефективності

Одним із найважливіших факторів забезпечення тривалої автономної роботи вузла збору сенсорних даних є ефективне використання режимів енергозбереження мікроконтролера. Оскільки проєктований пристрій призначений для періодичного моніторингу параметрів навколишнього середовища, більшу частину часу він не виконує активних обчислень або передачі даних. Саме тому використання спеціалізованих режимів низького енергоспоживання дозволяє суттєво знизити навантаження на джерело живлення та збільшити тривалість автономної роботи системи [1], [4], [5].

Мікроконтролер STM32L432KC належить до сімейства STM32L4, яке спеціально розроблене для застосувань із підвищеними вимогами до енергоефективності. Завдяки використанню сучасної архітектури ARM Cortex-M4 та оптимізованої системи керування живленням мікроконтролер підтримує декілька режимів роботи, що відрізняються рівнем споживання енергії та швидкістю відновлення працездатності після пробудження [1], [2].

У процесі аналізу технічних характеристик STM32L432KC було встановлено, що найбільш практичне значення для розроблюваного пристрою мають режими Sleep, Stop, Standby та Shutdown. Кожен із них має власні особливості та може використовуватися залежно від поточних умов функціонування системи.

У режимі Sleep припиняється виконання команд центральним процесором, однак продовжують працювати периферійні модулі та генератори тактових

сигналів. Такий режим забезпечує швидке відновлення роботи, проте рівень економії енергії залишається відносно невисоким. Тому його доцільно використовувати лише під час коротких пауз між окремими операціями обробки даних [4].

Більш ефективним є режим Stop, у якому вимикається більшість внутрішніх генераторів і периферійних модулів, але зберігається вміст оперативної пам'яті SRAM. Після виходу з цього режиму мікроконтролер може швидко відновити виконання програми без повторного завантаження основних параметрів системи. Саме цей режим найбільш повно відповідає вимогам проєктованого вузла збору сенсорних даних [4], [5].

Режими Standby та Shutdown забезпечують мінімальне енергоспоживання, однак потребують практично повної повторної ініціалізації системи після пробудження. Унаслідок цього збільшується час виходу в робочий режим та ускладнюється програмна реалізація алгоритму. З огляду на необхідність регулярного зчитування інформації від сенсорів використання цих режимів у межах даної роботи є менш доцільним [5].

Для порівняння основних режимів роботи STM32L432KC доцільно використати таблицю 3.1.

Таблиця 3.1 – Порівняння режимів енергозбереження STM32L432KC

Режим роботи	Орієнтовний струм споживання	Особливості використання
Run	5...10 мА	Повноцінне виконання програми
Sleep	десятки–сотні мкА	Зупинка CPU при активній периферії
Stop	1...5 мкА	Збереження SRAM та швидке пробудження
Standby	менше 1 мкА	Мінімальне споживання, часткова втрата даних
Shutdown	сотні нА	Найнижче енергоспоживання, повне відновлення після запуску

У розроблюваній системі алгоритм роботи побудований таким чином, що активний режим використовується лише під час виконання вимірювань та передачі даних через бездротовий канал зв'язку. Після завершення цих операцій мікроконтролер автоматично переходить у режим Stop і перебуває в ньому до моменту спрацювання таймера реального часу RTC. Такий підхід дозволяє суттєво зменшити середній струм споживання системи та підвищити ефективність використання акумуляторного джерела живлення [4], [5], [13].

Оцінка ефективності використання режимів енергозбереження показує, що за умови переходу мікроконтролера у режим Stop протягом більш ніж 90 % часу роботи середній струм споживання системи може бути зменшений у декілька разів порівняно з безперервним функціонуванням у режимі Run.

Це дозволяє збільшити час автономної роботи без зміни ємності акумулятора та без погіршення функціональних можливостей пристрою [4], [5]. Додаткового зниження енергоспоживання можна досягти шляхом вимкнення невикористовуваних периферійних модулів, використання контролера DMA для передавання даних без постійної участі центрального процесора, а також зменшення частоти опитування сенсорів у періоди низької активності системи [1], [13]. Перспективним напрямом є також адаптивне керування періодом вимірювань залежно від швидкості зміни контрольованих параметрів навколишнього середовища.

Таким чином, проведений аналіз показав, що для проєктованого вузла збору сенсорних даних найбільш доцільним є використання режиму Stop як основного режиму енергозбереження. Він забезпечує оптимальне співвідношення між швидкістю відновлення роботи, рівнем енергоспоживання та складністю програмної реалізації. Використання цього режиму дозволяє реалізувати енергоефективний сенсорний вузол, придатний для тривалого автономного функціонування у складі сучасних IoT-систем моніторингу [1], [4], [5], [13].

3.3 Розробка програмного забезпечення для збору та обробки сенсорних даних

Програмне забезпечення є ключовою складовою енергоефективного вузла збору сенсорних даних, оскільки саме воно забезпечує взаємодію між апаратними компонентами системи, виконання вимірювань, обробку отриманої інформації та передачу результатів до зовнішньої інформаційної системи. Для розроблення програмного забезпечення обрано середовище STM32CubeIDE, яке підтримує налаштування периферії за допомогою STM32CubeMX та дозволяє створювати програмні проєкти мовою C для мікроконтролерів сімейства STM32 [1], [8].

Основою програмної архітектури системи є циклічний алгоритм роботи, який був розглянутий у попередньому підрозділі. Програма виконує ініціалізацію апаратних ресурсів, періодичне опитування сенсорів, формування телеметричного пакета та передачу даних через Wi-Fi-модуль ESP8266 або ESP32 [13].

Для реалізації програмного забезпечення необхідно налаштувати такі периферійні модулі STM32L432KC:

- інтерфейс I²C для роботи з BME280;
- UART для обміну даними з ESP8266;
- RTC для організації періодичного пробудження;
- GPIO для роботи із сенсором DHT22;
- режими енергозбереження Stop та Sleep [4], [5].

Після запуску програми виконується ініціалізація периферійних модулів, код програми подано у лістингу 3.1.

Лістинг 3.1 – Ініціалізація периферійних модулів STM32

```
int main(void)
{
    HAL_Init();
    SystemClock_Config();
```

```

MX_GPIO_Init();
MX_I2C1_Init();
MX_USART2_UART_Init();
MX_RTC_Init();
while (1)
{
    Sensor_Task();
}

```

Кінець лістингу 3.1

Після налаштування периферії виконується опитування сенсора BME280 через інтерфейс I²C. Отримані дані використовуються для формування пакета вимірювань (лістинг 3.2).

Лістинг 3.2 – Зчитування даних із сенсора BME280

```

float temperature;
float humidity;
float pressure;
BME280_ReadValues(
    &temperature,
    &humidity,
    &pressure);

```

Кінець лістингу 3.2

Для забезпечення надійності роботи доцільно виконувати перевірку отриманих результатів вимірювань перед їх подальшою обробкою (лістинг 3.3).

Лістинг 3.3 – Перевірка коректності даних

```

if((temperature > -40) && (temperature < 85) &&
    (humidity >= 0) && (humidity <= 100)){    dataValid =
1;}
else
{    dataValid = 0;}

```

Кінець лістингу 3.3

Після перевірки виконується формування телеметричного пакета, який надалі передається через бездротовий канал зв'язку (лістинг 3.4).

Передача інформації до Wi-Fi-модуля реалізується через інтерфейс UART (лістинг 3.5). Такий підхід не потребує складної апаратної реалізації та забезпечує достатню швидкість обміну для задач моніторингу [13].

Лістинг 3.4 – Формування пакета даних

```
sprintf(txBuffer,
        "T=%.2f;H=%.2f;P=%.2f\r\n",
        temperature,
        humidity,
        pressure);
```

Кінець лістингу 3.4

Лістинг 3.5 – Передача даних через UART

```
HAL_UART_Transmit(&huart2,
                  (uint8_t*)txBuffer,
                  strlen(txBuffer),
                  1000);
```

Кінець лістингу 3.5

Для підвищення енергоефективності після завершення циклу вимірювання та передачі даних мікроконтролер переводиться у режим Stop (лістинг 3.6).

Лістинг 3.6 – Перехід у режим енергозбереження

```
HAL_SuspendTick();
HAL_PWR_EnterSTOPMode(PWR_LOWPOWERREGULATOR_ON,
                      PWR_STOPENTRY_WFI);
HAL_ResumeTick();
```

Кінець лістингу 3.6

Після спрацювання таймера RTC система автоматично пробуджується та виконує наступний цикл вимірювання (лістинг 3.7).

Лістинг 3.7 – Обробник пробудження від RTC

```
void HAL_RTC_AlarmAEventCallback(RTC_HandleTypeDef
                                 *hrtc)
```

```
{
    wakeUpFlag = 1;}
```

Кінець лістингу 3.7

На рисунку 3.1 показано структуру програмного забезпечення вузла збору сенсорних даних.

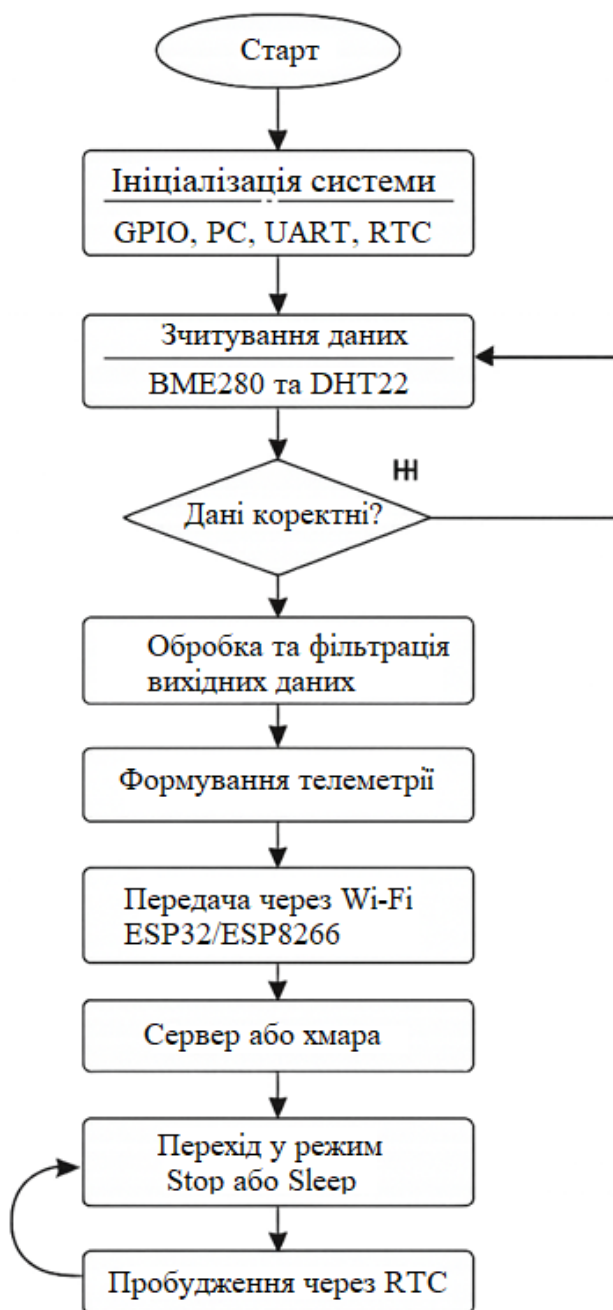


Рисунок 3.1 – Структура програмного забезпечення вузла збору сенсорних даних

Після запуску програми виконується ініціалізація периферійних модулів мікроконтролера STM32L432KC. Далі здійснюється опитування сенсорів BME280 та DHT22, обробка отриманих результатів вимірювання, формування телеметричного пакета та його передавання через Wi-Fi-модуль до віддаленого сервера.

Для зменшення енергоспоживання використовується окремий модуль керування режимами Sleep і Stop з пробудженням за допомогою таймера RTC.

Для підвищення надійності роботи програмне забезпечення може бути доповнене механізмами повторної передачі даних, контролем втрати зв'язку та веденням журналу помилок. Також перспективним напрямом є використання контролера DMA для обміну даними між периферійними модулями та пам'яттю без постійної участі центрального процесора, що додатково зменшує енергоспоживання системи [1], [4].

Таким чином, розроблене програмне забезпечення забезпечує виконання основних функцій проєктованого вузла збору сенсорних даних: отримання інформації від сенсорів, її перевірку та обробку, формування телеметричних повідомлень, передачу даних через бездротовий канал зв'язку та використання режимів енергозбереження STM32L432KC. Реалізований програмний підхід відповідає вимогам енергоефективності та може бути використаний як основа для створення автономних IoT-пристроїв моніторингу [1], [4], [5], [13].

РОЗДІЛ 4

ОХОРОНА ПРАЦІ ТА БЕЗПЕКА

4.1 Аналіз небезпечних факторів та електробезпека при роботі з електронними пристроями

Під час проектування, налагодження та експлуатації вбудованих електронних систем на базі мікроконтролерів STM32 необхідно враховувати вплив небезпечних та шкідливих виробничих факторів, які можуть негативно впливати як на персонал, так і на працездатність електронного обладнання. Незважаючи на те, що розроблюваний вузол збору сенсорних даних працює від безпечної напруги 3,3 В, під час його створення використовуються лабораторні джерела живлення, вимірювальні прилади, персональні комп'ютери та мережеве обладнання, які підключаються до електричної мережі змінного струму 220 В [1], [4].

До основних небезпечних факторів, що можуть виникати під час роботи з електронними пристроями, належать:

- ураження електричним струмом;
- короткі замикання в електричних колах;
- перегрівання елементів електронної схеми;
- виникнення пожежонебезпечних ситуацій;
- вплив електростатичних розрядів на електронні компоненти;
- механічні пошкодження обладнання та інструменту;
- електромагнітні завади та перенапруги [17], [18].

Найбільш небезпечним фактором є дія електричного струму на організм людини. Відомо, що проходження струму через тіло людини може призводити до порушення роботи нервової системи, опіків, судом м'язів та навіть зупинки серця. Особливу небезпеку становлять кола змінного струму частотою 50 Гц, що використовуються в побутових та виробничих електромережах [17].

Під час розробки електронного вузла збору сенсорних даних основні роботи виконуються із застосуванням низьковольтного обладнання. Проте

лабораторні блоки живлення, комп'ютери та вимірювальна апаратура живляться від мережі 220 В, тому необхідно дотримуватись вимог електробезпеки [17], [19].

Для забезпечення безпечних умов праці необхідно:

- використовувати справне електротехнічне обладнання;
- не працювати з пошкодженими кабелями та роз'ємами;
- виконувати підключення та відключення обладнання лише при вимкненому живленні;
- застосовувати блоки живлення із захистом від короткого замикання;
- контролювати правильність полярності підключення елементів;
- не торкатися струмопровідних частин під напругою [17], [18].

Особливу увагу необхідно приділяти захисту електронних компонентів від електростатичних розрядів. Сучасні мікроконтролери STM32, сенсори BME280, DHT22 та модулі ESP8266 є чутливими до електростатичного впливу. Навіть короточасний розряд може призвести до пошкодження напівпровідникових структур або прихованих дефектів, які проявляються під час експлуатації пристрою [1], [6], [13].

Для захисту від електростатичних розрядів рекомендується використовувати антистатичні килимки, заземлені браслети та спеціальну упаковку для зберігання електронних компонентів. Монтаж та налагодження пристрою доцільно виконувати на антистатичному робочому місці [18].

Додатковим фактором небезпеки є можливість перегрівання електронних компонентів. Причинами перегріву можуть бути неправильне підключення елементів, перевищення допустимих струмів навантаження або несправність джерела живлення. Для запобігання таким ситуаціям необхідно забезпечувати контроль температурного режиму роботи пристрою та використовувати елементи відповідно до їх технічних характеристик [4], [10].

Під час експлуатації розробленого вузла збору сенсорних даних доцільно застосовувати стабілізоване джерело живлення 3,3 В із захистом від перевантаження та короткого замикання. У схемі також повинні бути передбачені фільтрувальні конденсатори та засоби захисту від імпульсних

перенапруг [10], [11], [13].

Таким чином, аналіз небезпечних факторів показує, що основними ризиками під час роботи з розробленим електронним пристроєм є ураження електричним струмом, вплив електростатичних розрядів, перегрівання елементів та виникнення коротких замикань. Дотримання вимог електробезпеки, використання справного обладнання та застосування засобів захисту дозволяють забезпечити безпечні умови виконання робіт під час розробки, налагодження та експлуатації енергоефективного вузла збору сенсорних даних на базі STM32 [17, 20].

4.2 Ергономіка робочого місця та заходи безпеки під час експлуатації системи

Під час розроблення, налагодження та тестування вузла збору сенсорних даних на базі STM32L432KC важливим є забезпечення належних ергономічних умов праці. Рациональна організація робочого місця сприяє зменшенню втомлюваності оператора, підвищенню продуктивності праці та зниженню ризику виникнення професійних захворювань [17], [18].

Робоче місце розробника повинно бути обладнане персональним комп'ютером, лабораторним блоком живлення, вимірювальними приладами та засобами налагодження електронних пристроїв. Монітор необхідно розташовувати на відстані 50...70 см від очей користувача, а верхня межа екрана повинна знаходитися приблизно на рівні очей. Таке розташування дозволяє зменшити навантаження на органи зору та шийний відділ хребта [18], [19].

Освітлення робочої зони повинно бути достатнім для виконання монтажних і налагоджувальних робіт. Рекомендовано використовувати комбіноване освітлення, яке поєднує природне та штучне світло. Рівень освітленості робочої поверхні повинен відповідати вимогам чинних норм охорони праці [17].

Під час роботи з електронними компонентами необхідно дотримуватися

правил електробезпеки та захисту від електростатичних розрядів. Монтаж і налагодження мікроконтролера STM32, сенсорів BME280, DHT22 та Wi-Fi-модуля ESP8266 доцільно виконувати на антистатичному робочому місці із застосуванням заземленого браслета [18].

На рисунку 4.1 показано робочий стіл із персональним комп'ютером, монітором, лабораторним блоком живлення, платою STM32, вимірювальними приладами та антистатичним килимком. Також відображено рекомендовану відстань від очей до монітора (50...70 см), правильне положення користувача та розташування основного обладнання в зоні комфортної досяжності.



Рисунок 4.1 – Ергономічно організоване робоче місце розробника вбудованих електронних систем

Це дозволяє продемонструвати дотримання вимог ергономіки та безпеки

під час роботи з електронними пристроями [18], [19].

Для забезпечення безпечної експлуатації системи необхідно регулярно перевіряти стан з'єднувальних проводів, роз'ємів і джерела живлення. Не допускається використання пошкоджених кабелів або обладнання з ознаками перегрівання. Підключення та відключення модулів рекомендується виконувати лише при вимкненому живленні [17], [20].

Таким чином, дотримання вимог ергономіки та правил безпеки під час роботи з електронними пристроями забезпечує комфортні умови праці, підвищує надійність функціонування обладнання та зменшує ризик виникнення аварійних ситуацій під час експлуатації розробленого вузла збору сенсорних даних [19], [20].

ВИСНОВКИ

1. Проведено аналіз сучасних вбудованих систем збору сенсорних даних та технологій Інтернету речей. Встановлено перспективність використання сенсорних вузлів для автоматизованого моніторингу параметрів навколишнього середовища.

2. Виконано аналіз мікроконтролерних платформ Arduino, ESP32 та STM32. Обґрунтовано вибір STM32L432KC завдяки низькому енергоспоживанню, розвиненій периферії та підтримці режимів енергозбереження.

3. Досліджено методи підвищення енергоефективності вбудованих систем. Встановлено, що використання режимів сну, локальної обробки даних та оптимізації програмного забезпечення дозволяє зменшити споживання енергії.

4. Обрано сенсори та інтерфейси передачі даних для реалізації системи. Для вимірювання параметрів середовища використано BME280, а для обміну даними – інтерфейси I²C, UART та Wi-Fi-модуль ESP8266/ESP32.

5. Розроблено структурну, функціональну та принципову електричну схеми енергоефективного вузла збору сенсорних даних на базі STM32L432KC та визначено взаємодію його основних функціональних блоків.

6. Реалізовано алгоритм роботи системи, який включає зчитування даних із сенсорів, їх обробку, формування інформаційних пакетів, передачу через Wi-Fi та використання режимів енергозбереження.

7. Виконано розрахунок енергоспоживання пристрою та параметрів джерела живлення. Підтверджено доцільність використання режимів енергозбереження для збільшення часу автономної роботи.

8. Розроблено програмне забезпечення мовою C у середовищі STM32CubeIDE, яке забезпечує збір, обробку та передачу сенсорних даних. Отримані результати підтверджують можливість створення енергоефективного вузла збору даних для IoT-систем.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. STMicroelectronics. STM32 Microcontroller Portfolio. Geneva: STMicroelectronics, 2025. 112 p. URL: <https://www.st.com/en/microcontrollers-microprocessors/stm32-32-bit-arm-cortex-mcus.html> (дата звернення: 27.05.2026).
2. STMicroelectronics. STM32L476xx Ultra-Low-Power ARM Cortex-M4 32-bit MCU Datasheet. Geneva: STMicroelectronics, 2024. 270 p. URL: <https://www.st.com/resource/en/datasheet/stm32l476rg.pdf> (дата звернення: 10.03.2026).
3. STMicroelectronics. STM32U585xx Ultra-Low-Power ARM Cortex-M33 32-bit MCU Datasheet. Geneva: STMicroelectronics, 2024. 350 p. URL: <https://www.st.com/resource/en/datasheet/stm32u585ai.pdf> (дата звернення: 10.03.2026).
4. STMicroelectronics. AN4777: How to Optimize Power Consumption on STM32 MCUs. Geneva: STMicroelectronics, 2024. 33 p. URL: <https://www.st.com> (дата звернення: 20.03.2026).
5. STMicroelectronics. AN5289: Getting Started with Ultra-Low-Power STM32L4 Series and STM32L4+ Series Hardware Development. Geneva: STMicroelectronics, 2024. 48 p. URL: <https://www.st.com> (дата звернення: 20.03.2026).
6. Bosch Sensortec. BME280 Combined Humidity and Pressure Sensor Datasheet. Reutlingen: Bosch Sensortec GmbH, 2024. 56 p. URL: <https://www.bosch-sensortec.com> (дата звернення: 20.03.2026).
7. Bosch Sensortec. BMP280 Digital Pressure Sensor Datasheet. Reutlingen: Bosch Sensortec GmbH, 2024. 54 p. URL: <https://www.bosch-sensortec.com> (дата звернення: 27.05.2026).
8. Analog Devices. DS18B20 Programmable Resolution 1-Wire Digital Thermometer Datasheet. Wilmington: Analog Devices, 2024. 22 p. URL: <https://www.analog.com> (дата звернення: 17.04.2026).
9. Aosong Electronics. DHT22 Temperature and Humidity Sensor Technical

Manual. Guangzhou: Aosong Electronics, 2023. 12 p. URL: <https://www.aosong.com> (дата звернення: 17.04.2026).

10. Erickson R. W., Maksimović D. Fundamentals of Power Electronics. 3rd ed. Cham: Springer, 2020. 1081 p.

11. Horowitz P., Hill W. The Art of Electronics. 3rd ed. Cambridge: Cambridge University Press, 2015. 1220 p.

12. Кравець В. О. Енергоефективні мікропроцесорні системи: навчальний посібник. Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2022. 248 с.

13. Бойко Ю. М., Руденко О. Г. Вбудовані системи та периферійні пристрої: навчальний посібник. Львів: Новий Світ-2000, 2021. 312 с.

14. Сверстюк А. С., Пітух І. Р. Проектування енергоощадних електронних пристроїв: монографія. Тернопіль: ТНТУ, 2023. 286 с.

15. EasyEDA. EasyEDA Std User Guide. Shenzhen: EasyEDA, 2025. URL: <https://docs.easyeda.com/> (дата звернення: 20.04.2026).

16. Maxim Integrated. DS18B20 Programmable Resolution 1-Wire Digital Thermometer Datasheet. San Jose: Maxim Integrated, 2024. 27 p.

17. Bosch Sensortec. BME280 Combined Humidity and Pressure Sensor Datasheet. Reutlingen: Bosch Sensortec, 2024. 58 p.

18. Про затвердження Правил охорони праці під час експлуатації електронно-обчислювальних машин: Наказ Держгірпромнагляду України від 26.03.2010 № 65. База даних «Законодавство України». Верховна Рада України. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/go/z0293-10> (дата звернення: 27.05.2026).

19. Про затвердження Типового положення про порядок проведення навчання і перевірки знань з питань охорони праці: Наказ Держнаглядохоронпраці України від 26.01.2005 № 15. База даних «Законодавство України». Верховна Рада України. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/go/z0231-05> (дата звернення: 27.05.2026).

20. ДСТУ EN IEC 62368-1:2023. Обладнання аудіо-, відео-, інформаційних та телекомунікаційних технологій. Вимоги безпеки. Київ: ДП «УкрНДНЦ», 2023. 312 с.