

Вінницький національний технічний університет
Факультет інформаційних технологій та комп'ютерної інженерії
Кафедра обчислювальної техніки

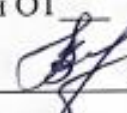
КОМПЛЕКСНА БАКАЛАВРСЬКА КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

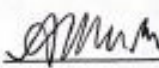
на тему:

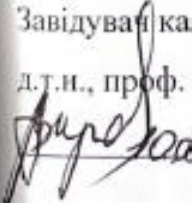
« Апаратно-програмний комплекс моніторингу стану оточуючого середовища на базі IoT засобів. Частина 1. Апаратне забезпечення »
08-54. КБКР.038.00.000 ПЗ

Виконав: студент 4 курсу, групи ІКІ-216
спеціальності 123 — Комп'ютерна інженерія
освітня програма — «Комп'ютерна інженерія»

 Павленко П.І.

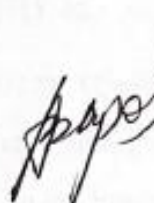
Керівник: к.т.н., доц. кафедри ОТ
Богомолів С. В. 

Рецензент: к.фіз.-мат. н., доц. кафедри МБіС
 Шиян А. А.

Допущено до захисту
Завідувач кафедри ОТ
д.т.н., проф. Азаров О.Д.
 2025 року

Вінниця ВНТУ — 2025 рік

Вінницький національний технічний університет
Факультет інформаційних технологій та комп'ютерної інженерії
Кафедра обчислювальної техніки
Освітньо-кваліфікаційний рівень бакалавр
Галузь знань – 12 – Інформаційні технології
Спеціальність – 123 – Комп'ютерна інженерія
Освітньо-професійна програма – Комп'ютерна інженерія

 **ЗАТВЕРДЖУЮ**
Завідувач кафедри ОТ
д.т.н., проф. _____ Азаров О.Д.
«21» березня 2025 року

З А В Д А Н Н Я
НА КОМПЛЕКСНУ БАКАЛАВРСЬКУ КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ
СТУДЕНТУ

Павленку Павлу Ігоровичу

- 1 Тема роботи: Апаратно-програмний комплекс моніторингу стану оточуючого середовища на базі IoT засобів. Частина 1. Апаратна частина, керівник роботи Богомолів Сергій Віталійович, к.т.н., доцент кафедри ОТ, затверджено наказом вищого навчального закладу від «20» березня 2025 року №97.
- 2 Термін подання студентом роботи 13.05.2025
- 3 Вихідні дані до роботи: сенсори (BH1750 , BMP280, MQ-135), мікроконтролер ESP32-WROOM, елементи живлення — акумулятор типу 18650, перетворювач S7V8F5, інтерфейси (GPIO, I2C, аналоговий вхід), середовище розробки Arduino IDE; схема електрична принципова, технічна специфікація та умови автономної роботи.
- 4 Зміст розрахунково-пояснювальної записки: вступ; теоретичні основи побудови IoT-систем моніторингу довкілля; проектування апаратної частини системи; експериментальне дослідження; тестування; висновки.
- 5 Перелік ілюстративного матеріалу: структурна схема IoT-системи; схема з'єднання компонентів; візуалізація монтажу сенсорів; фотографії прототипу пристрою; таблиці результатів тестування.

6 Консультанти розділів роботи приведено в таблиці 1.

Таблиця 1 — Консультанти розділів роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		видав	прийняв
1-4	Богомолів С.В., к.т.н., доцент каф. ОТ	21.03.25	13.04.25
Нормоконтроль	ас. каф. ОТ Швець С. І.	14.05.25	30.05.25

7 Дата видачі завдання 21.03.2025 р.

8 Календарний план виконання БКР приведений в таблиці 2.

Таблиця 2 — Календарний план

№ з/п	Назва етапів дипломної роботи	Термін виконання	Підпис
1	Аналіз постановки задачі та формулювання мети	21.03.25 – 25.03.25	вик.
2	Огляд сучасних IoT-систем моніторингу довкілля	26.03.25 – 30.03.25	вик.
3	Обґрунтування вибору ESP32 та сенсорів VCN1750, MQ-135, BMP280	31.03.25 – 05.04.25	вик.
4	Розробка загальної структурної схеми апаратного комплексу	06.04.25 – 09.04.25	вик.
5	Підготовка схеми з'єднання компонентів	10.04.25 – 14.04.25	вик.
6	Фізична збірка та монтаж IoT-системи	15.04.25 – 19.04.25	вик.
7	Перевірка працездатності компонентів	20.04.25 – 24.04.25	вик.
8	Проведення тестування системи в реальних умовах	25.04.25 – 30.04.25	вик.
9	Калібрування сенсорів та зняття контрольних вимірювань	01.05.25 – 03.05.25	вик.
10	Аналіз результатів, виявлення недоліків	04.05.25 – 06.05.25	вик.
11	Оформлення пояснювальної записки та підготовка ілюстрацій	07.05.25 – 11.05.25	вик.
12	Перевірка якості виконання БКР, усунення недоліків	12.05.25 – 13.05.25	вик.

Студент

Керівник роботи

Павло ПАВЛЕНКО

к.т.н., доц. каф. ОТ Сергій БОГОМОЛОВ

АНОТАЦІЯ

УДК: 004.738.5:004.77:621.396.96

Павленко П. І. Апаратне забезпечення. Бакалаврська кваліфікаційна дипломна робота зі спеціальності 123 «Комп'ютерна інженерія», освітня програма «Комп'ютерна інженерія». Вінниця: ВНТУ, 2025. 79 с.

На укр. мові. Бібліогр.: 26 назв, рис.: 14, табл.: 1.

Під час виконання комплексної дипломної роботи було розроблено апаратну частину IoT-системи для моніторингу стану навколишнього середовища в режимі реального часу.

В роботі здійснено аналіз сучасних архітектур IoT-систем, виконано обґрунтування вибору апаратних компонентів, зокрема мікроконтролера ESP32-WROOM, сенсорів BH1750, BMP280 і MQ-135, а також схеми автономного живлення на основі акумулятора 18650 та перетворювача S7V8F5.

Наведено структурну схему, описано технічні особливості з'єднання компонентів, а також представлено результати тестування, калібрування сенсорів та оцінки стабільності роботи системи. Проведено експериментальне дослідження в умовах реального середовища. Отриманими результатами підтверджено ефективність запропонованого підходу до побудови енергоефективного, масштабованого та адаптивного апаратного рішення.

Ключові слова: моніторинг середовища, IoT, ESP32-WROOM, BH1750, MQ-135, BMP280, апаратна частина, сенсорна система, живлення 18650.

ABSTRACT

Pavlenko P. I. Hardware for Environmental Monitoring Based on IoT Technologies. Bachelor's qualification thesis in the specialty 123 "Computer Engineering", study program "Computer Engineering". Vinnytsia: VNTU, 2025. 79 p.

In Ukrainian. References: 26 titles, illustrations: 14, tables: 1.

This bachelor's thesis focuses on the development of the hardware component of an IoT-based environmental monitoring system designed to operate in real-time.

The work presents an overview of current IoT architectures and justifies the selection of hardware components, including the ESP32-WROOM microcontroller, BH1750 light sensor, BMP280 temperature and pressure sensor, and MQ-135 air quality sensor, along with a power supply system based on a 18650 Li-ion battery and a S7V8F5 step-up/step-down voltage regulator.

The thesis includes the design of the system's structural and electrical schematics, a detailed description of component integration, as well as the results of testing, calibration, and performance evaluation of the assembled system. Experimental research in real-world conditions confirms the viability of the developed energy-efficient, scalable, and autonomous solution for environmental data acquisition.

Keywords: environmental monitoring, IoT, ESP32-WROOM, BH1750, MQ-135, BMP280, sensor network, embedded system, 18650 battery power supply.

ЗМІСТ

ВСТУП	4
1 ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ ПОБУДОВИ ІОТ-СИСТЕМ ДЛЯ МОНІТОРИНГУ СТАНУ НАВКОЛИШНЬОГО СЕРЕДОВИЩА	6
1.1 Актуальність моніторингу стану оточуючого середовища	6
1.2 Поняття Інтернету речей (IoT)	7
1.3 Класифікація та характеристика апаратних засобів для IoT	9
1.4 Принципи побудови апаратної частини IoT-систем	12
1.5 Особливості побудови мережі IoT	14
1.6 Загальне живлення систем IoT	16
1.7 Порівняння існуючих рішень та вибір архітектури для проєкту	21
2 ПРОЄКТУВАННЯ АПАРАТНОГО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ІОТ-СИСТЕМИ МОНІТОРИНГУ	26
2.1 Загальна структура апаратного комплексу	26
2.2 Вибір мікроконтролера ESP32-WROOM	28
2.3 Електронні компоненти	31
2.3.1 Характеристика давача BH1750 та його функціонального призначення	31
2.3.2 Характеристика давача MQ-135 та його функціонального призначення	34
2.3.3 Характеристика давача BMP280 та його функціонального призначення	36
2.4. Побудова системи живлення апаратного комплексу	38
2.4.1 Підвищуючий/знижуючий перетворювач 5В 1А S7V8F5 від Pololu	38
2.4.2 Живлення від батареї 18650	41
2.5 Компонування системи	43
2.6 Відлагодження системи	44
3 ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ ТА ТЕСТУВАННЯ АПАРАТНОГО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ	49
3.1 З'єднання компонентів	49
3.2 Перевірка працездатності	53
3.3 Умови проведення випробувань	55

3.4 Реакція та поведінка окремих сенсорів	57
3.5 Калібрування датчиків	59
4 ПЕРСПЕКТИВИ ВДОСКОНАЛЕННЯ ТА ПОДАЛЬШОГО РОЗВИТКУ ..	62
4.1 Тестування на стійкість до впливів	62
4.1.1 Температурні випробування	62
4.1.2 Вологість та пил	63
4.1.4 Коливання напруги живлення	64
4.2.1 Загальна оцінка працездатності системи	65
4.2.2 Виявлені недоліки	65
4.2.3 Висновки щодо результатів тестування	66
4.3 Перспективи покращення апаратної частини	66
4.3.1 Оптимізація системи живлення	67
4.3.2 Розширення та масштабування	67
4.3.3 Покращення апаратної надійності	67
4.3.4 Вдосконалення програмного забезпечення апаратної частини	68
4.3.5 Впровадження системи дистанційного оновлення	68
4.3.6 Використання машинного навчання та аналітики	68
ВИСНОВКИ	70
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	71
ДОДАТОК А Технічне завдання	74
ДОДАТОК Б Протокол перевірки навчальної (кваліфікаційної) роботи	78
ДОДАТОК В Графічна частина	79
ДОДАТОК Г Лістинг програмного коду калібрування давача MQ-135	81
ДОДАТОК Д Лістинг програмного коду калібрування давача BMP280	82

ВСТУП

Інтенсивний розвиток промисловості, транспорту та урбанізації зумовлює зростання навантаження на навколишнє середовище, що, у свою чергу, вимагає впровадження новітніх засобів для його моніторингу. Одним із сучасних підходів до вирішення цього завдання є використання технологій Інтернету речей (IoT), які дозволяють створювати автоматизовані системи збору, обробки та передавання даних з екологічних сенсорів. Завдяки таким системам можна здійснювати постійний контроль за параметрами довкілля у режимі реального часу, що особливо актуально в умовах кліматичних змін та зростання забруднення.

У дипломній роботі спроектовано та досліджено IoT-систему моніторингу навколишнього середовища на базі мікроконтролера ESP32 та сенсорів BH1750, MQ-135, BMP280. Створена система призначена для вимірювання рівня освітленості, температури, атмосферного тиску та якості повітря. Вона здатна передавати отримані дані на віддалений сервер або зберігати локально з можливістю подальшого аналізу.

Актуальність теми обумовлена необхідністю оперативного виявлення небезпечних змін у навколишньому середовищі, що дозволяє своєчасно реагувати на потенційні загрози для здоров'я людей та стану екосистем. У зв'язку з цим виникає потреба у створенні доступного, енергоефективного та масштабованого пристрою для екологічного моніторингу.

Об'єктом дослідження є процеси збору та передавання екологічних даних за допомогою вбудованих електронних систем.

Предмет дослідження — мікроконтролерні технології та сенсорні пристрої, що застосовуються в екологічних IoT системах.

Мета роботи — розробка енергозберігаючої та ефективної IoT-системи для моніторингу параметрів навколишнього середовища з використанням ESP32 та відповідної сенсорної бази.

Основними завданнями, які необхідно вирішити в межах дипломної роботи, є:

— аналіз сучасного стану та методів реалізації IoT-систем моніторингу;

- вибір та обґрунтування апаратної архітектури;
- опис функціонування обраних сенсорів;
- проектування схеми з'єднання компонентів;
- проведення тестування та аналіз ефективності роботи створеної системи.

Практичне значення полягає у створенні прототипу екологічного моніторингового вузла, що може бути використаний у різних сферах — від освітніх цілей до реального впровадження у розумні міста, агропромисловість та інші галузі. В основі системи лежить недорога та енергоефективна апаратна платформа, що забезпечує простоту масштабування та адаптацію до конкретних умов експлуатації.

Наукова новизна роботи полягає в інтеграції різних сенсорів у єдину IoT-систему з локальною обробкою даних, що дозволяє забезпечити високу точність вимірювань при мінімальних апаратних та енергетичних витратах.

Публікація за темою роботи: Використання технологій бездротового зв'язку у проєктах концепції Інтернету Речей (Internet of Things) / Павленко П. І., Довгань В. В., Богомолів С. В. // Матеріали Міжнародної науково-практичної Інтернет-конференції «Молодь в науці: дослідження, проблеми, перспективи», 2025 р. Режим доступу: <https://conferences.vntu.edu.ua/index.php/mn/mn2025/author/submission/25218>

1 ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ ПОБУДОВИ ІОТ-СИСТЕМ ДЛЯ МОНІТОРИНГУ СТАНУ НАВКОЛИШНЬОГО СЕРЕДОВИЩА

1.1 Актуальність моніторингу стану оточуючого середовища

У ХХІ столітті людство зіткнулося з низкою екологічних викликів, що суттєво впливають як на якість життя населення, так і на довкілля в цілому. Забруднення атмосферного повітря, зниження якості питної води, деградація ґрунтів, зростання рівня шкідливих викидів від промислових підприємств, автотранспорту, спалювання відходів — усе це викликає нагальну потребу у постійному моніторингу стану оточуючого середовища.

Особливо актуальним це питання є для густонаселених територій, промислових зон та регіонів з розвинутою інфраструктурою. Підвищена концентрація шкідливих речовин у повітрі, зокрема таких як чадний газ, діоксид азоту, діоксид сірки, озон, а також зважені частинки, безпосередньо впливає на стан здоров'я населення. За даними Всесвітньої організації охорони здоров'я, щороку мільйони людей страждають від захворювань, викликаних поганою якістю повітря.

Класичні методи моніторингу стану довкілля, які використовуються державними екологічними службами, зазвичай включають стаціонарні вимірювальні станції, складне лабораторне обладнання, ручний збір та обробку даних. Хоча ці методи є досить точними, вони характеризуються високою вартістю, складністю обслуговування та обмеженим географічним покриттям. Крім того, вони не дозволяють оперативно реагувати на зміни в екологічній ситуації, що часто є критичним фактором, особливо в разі аварій або надзвичайних ситуацій.

З огляду на це, виникає необхідність у впровадженні нових технологічних рішень, які здатні забезпечити оперативний, точний і масштабований моніторинг параметрів навколишнього середовища. Інтернет речей (Internet of Things, IoT) відкриває нові горизонти у цій сфері. IoT-технології дозволяють створювати великі мережі недорогих сенсорів, здатних збирати дані в режимі реального часу та передавати їх у хмарні сервіси для подальшого аналізу, візуалізації та

прийняття рішень [11].

Сучасні датчики, такі як MQ-135, що реагує на широкий спектр шкідливих газів включно з аміаком, оксидами азоту, бензолом, димом і парами спирту, та BH1750 — цифровий сенсор освітленості, у поєднанні з потужними мікроконтролерами такі як ESP32, створюють можливість зібрати потужну, автономну, енергоефективну систему моніторингу, яку можна розгорнути як у місті, так і у віддалених регіонах.

Особливо важливим є те, що такі системи можуть легко інтегруватися у мобільні додатки або веб-сервіси, роблячи дані доступними не лише для дослідників чи органів влади, а й для пересічних громадян. Це підвищує рівень обізнаності населення, сприяє екологічній просвіті, а також дозволяє кожному оцінювати якість повітря у своєму мікрорайоні, обираючи оптимальні маршрути пересування або час для занять на свіжому повітрі.

Крім того, такі системи можуть бути важливим елементом у формуванні так званих «розумних міст», де інфраструктура адаптується до потреб жителів та змін навколишнього середовища. У перспективі це дозволяє органам місцевої влади ефективніше розподіляти ресурси, знижувати витрати на утримання екологічних служб та своєчасно реагувати на зміни екологічної обстановки.

Підсумовуючи, можна зазначити, що моніторинг стану оточуючого середовища є надзвичайно актуальним завданням сучасності. Впровадження IoT-рішень у цій сфері дозволяє реалізувати новий рівень автоматизації, доступності, надійності та ефективності екологічного контролю. Саме тому розробка апаратно-програмного комплексу моніторингу навколишнього середовища на базі IoT-засобів є науково й практично обґрунтованою, перспективною та необхідною для збереження довкілля та здоров'я майбутніх поколінь [12].

1.2 Поняття Інтернету речей (IoT)

Інтернет речей (англ. Internet of Things, IoT) — це концепція мережі фізичних об'єктів або речей, які оснащені вбудованими сенсорами, програмним забезпеченням та іншими технологіями з метою з'єднання та обміну даними з

іншими пристроями через інтернет або інші мережі зв'язку. Ці об'єкти можуть бути як побутовими приладами, так і промисловими установками, транспортними засобами, медичним обладнанням чи екологічними сенсорами.

Основною ідеєю IoT є забезпечення автоматичного збору, обробки та обміну інформацією між пристроями без активного втручання людини. Завдяки цьому можна значно підвищити ефективність і точність контролю, моніторингу, управління системами в реальному часі. IoT вже сьогодні використовується в таких сферах, як розумний дім, охорона здоров'я, енергетика, логістика, сільське господарство та екологічний моніторинг.

Концепція IoT була запропонована ще наприкінці 1990-х років, однак широке впровадження розпочалося із розвитком бездротових технологій, мініатюризацією сенсорів, зниженням вартості обчислювальної техніки та поширенням хмарних технологій.

Сучасні IoT-системи, зазвичай, включають наступні компоненти:

- пристрої-збірники даних - вимірюють фізичні параметри : температура, вологість, рівень освітлення, газові концентрації;
- обчислювальні модулі - обробляють дані, отримані із сенсорів, виконують логіку пристрою;
- комунікаційні модулі - забезпечують передачу даних до інших пристроїв або хмарних сервісів через Wi-Fi, Bluetooth, LoRa, ZigBee, GSM;
- серверна частина - здійснює довготривале зберігання, аналіз, візуалізацію даних;
- користувацькі інтерфейси - дають змогу відображати інформацію кінцевому користувачу.

Залежно від сфери застосування, IoT-пристрої можуть функціонувати автономно, в складі локальних або глобальних мереж. Однією з особливостей таких систем є масштабованість — можливість без особливих труднощів додавати нові пристрої в мережу. Крім того, для IoT характерні такі риси, як енергоефективність, компактність та можливість роботи в автономному режимі тривалий час.

У контексті моніторингу стану довкілля IoT є ідеальним рішенням, адже дозволяє створювати розподілені системи збору даних у великих масштабах. Наприклад, у місті можна встановити сотні вузлів моніторингу якості повітря, кожен з яких буде відправляти актуальні вимірювання в загальну базу даних. Завдяки цьому створюється детальна карта екологічної ситуації з точністю до кварталу чи вулиці.

При цьому важливо розуміти, що IoT — це не лише апаратні пристрої. Це також взаємодія із хмарними сервісами, безпека передачі даних, управління великою кількістю об'єктів у реальному часі. Для успішного впровадження таких систем необхідне комплексне проектування як апаратної, так і програмної частини, а також продумана архітектура обміну даними.

Іншим важливим моментом є протоколи зв'язку. Найбільш поширеними є MQTT (Message Queuing Telemetry Transport), HTTP/HTTPS, CoAP (Constrained Application Protocol). MQTT, наприклад, розроблений спеціально для малопотужних пристроїв, що передають дані через нестабільні або обмежені за пропускною здатністю канали зв'язку. Завдяки такому підходу IoT-пристрої можуть працювати з мінімальним енергоспоживанням, що важливо для автономних екологічних сенсорів [13].

На практиці, для побудови IoT-системи моніторингу стану навколишнього середовища часто використовуються контролери типу ESP32, які мають інтегрований Wi-Fi та Bluetooth, а також значні обчислювальні ресурси. У поєднанні з датчиками наприклад, BH1750, MQ-135, вони дозволяють збирати дані про освітленість, концентрації шкідливих газів та інші параметри навколишнього середовища.

Отже, Інтернет речей — це не просто нова технологія, а справжня трансформація способу взаємодії з фізичним світом, яка надає принципово нові можливості для автоматизованого збору та аналізу даних у різних галузях, включаючи екологічний моніторинг. Саме на цій концепції базується запропонований у дипломній роботі апаратно-програмний комплекс.

1.3 Класифікація та характеристика апаратних засобів для IoT

Апаратні засоби Інтернету речей є основою будь-якої IoT-системи, оскільки саме вони забезпечують взаємодію з фізичним середовищем — збирають дані, обробляють їх та передають далі до інших пристроїв чи у хмару. У структурі типової IoT-системи апаратна частина включає мікроконтролери, сенсори, модулі зв'язку, блоки живлення та додаткові пристрої. Усі ці компоненти мають свої особливості та варіанти реалізації, що й визначає загальні характеристики IoT-платформи.

Ключову роль у будь-якому пристрої відіграє мікроконтролер — електронний компонент, що виконує функції управління, обробки сигналів від сенсорів та організації зв'язку з іншими пристроями. Існує велика кількість моделей мікроконтролерів, які відрізняються між собою за тактовою частотою, обсягом пам'яті, кількістю портів введення/виведення, енергоспоживанням, наявністю вбудованих інтерфейсів зв'язку Wi-Fi, Bluetooth, UART, I2C, SPI та іншими характеристиками.

Одним із найпоширеніших контролерів в IoT-середовищі є ESP32. Цей мікроконтролер розроблено компанією Espressif, і він вирізняється високою продуктивністю та широким функціональним набором при низькій вартості. ESP32 має двоядерний процесор, вбудовані модулі Wi-Fi та Bluetooth, що дозволяє створювати бездротові рішення без додаткових зовнішніх модулів. Крім того, мікроконтролер має велику кількість портів GPIO, підтримує різні інтерфейси UART, I2C, SPI, що значно розширює можливості підключення датчиків. Його енергоефективність дозволяє реалізовувати автономні рішення з живленням від акумуляторів або батарей. Завдяки своїм технічним характеристикам ESP32 широко використовується в системах моніторингу, розумного дому, автоматизації виробництва та екологічного аналізу [14].

Не менш важливими елементами є сенсори — саме вони забезпечують збирання фізичних параметрів середовища. В IoT-проектах використовуються різноманітні типи сенсорів: температури, вологості, освітленості, тиску, газового складу повітря, пилу, звуку тощо. Залежно від специфіки задачі, до системи підбираються відповідні датчики, які мають необхідну чутливість, точність і

стабільність.

Для вимірювання освітленості часто використовують датчик BH1750. Це цифровий сенсор, що працює за інтерфейсом I2C і дозволяє точно вимірювати рівень освітлення в люксах. Його перевагою є стабільна робота при змінному освітленні, низьке енергоспоживання та компактні розміри. BH1750 ідеально підходить для застосування у пристроях, які повинні реагувати на зміну світлового фону, наприклад, у системах автоматичного керування освітленням або моніторингу зовнішнього середовища.

Для аналізу якості повітря часто застосовується датчик MQ-135. Він реагує на широкий спектр шкідливих газів, таких як аміак, оксиди азоту, спирти, бензол, дим, а також на вуглекислий газ. MQ-135 — це аналоговий датчик, тому для його використання потрібна попередня калібровка та аналіз даних за допомогою АЦП (аналогово-цифрового перетворювача), вбудованого в мікроконтролер. Незважаючи на те, що MQ-135 не забезпечує абсолютної точності у вимірюваннях, він добре підходить для відносного контролю якості повітря та виявлення забруднення. Це робить його ефективним для попереднього екологічного моніторингу у міських умовах [15].

Комунікаційні можливості системи забезпечуються за допомогою вбудованих у контролер або зовнішніх модулів. Найпоширенішим стандартом зв'язку в IoT є Wi-Fi — він забезпечує високу швидкість передавання даних та просту інтеграцію з існуючими мережами. Bluetooth також використовується, зокрема для обміну даними з мобільними пристроями на коротких відстанях. У випадках, коли пристрої розташовані далеко від точок доступу, використовують такі протоколи, як LoRa або GSM, однак вони потребують додаткових модулів.

Ще одним важливим компонентом є джерело живлення. IoT-системи часто працюють автономно, тому вибір живлення визначає час безперервної роботи. Зазвичай застосовуються літій-іонні акумулятори або батарейки, іноді в поєднанні із сонячними панелями. Для підвищення енергоефективності використовуються режими сну мікроконтролера, які дозволяють суттєво зменшити енергоспоживання під час бездіяльності пристрою.

Таким чином, апаратна частина IoT-системи — це комплекс взаємопов'язаних пристроїв, кожен з яких виконує свою функцію. Правильний вибір мікроконтролера, сенсорів та модулів зв'язку є критично важливим для забезпечення надійної та енергоефективної роботи системи моніторингу. У межах цієї дипломної роботи було обрано мікроконтролер ESP32-WROOM як потужну, надійну та доступну платформу, а також сенсори BH1750 і MQ-135, що дозволяють здійснювати базовий моніторинг параметрів навколишнього середовища — рівня освітлення та якості повітря [16].

1.4 Принципи побудови апаратної частини IoT-систем

Побудова апаратної частини IoT-системи вимагає комплексного підходу, що включає розуміння як загальної архітектури системи, так і специфіки кожного компонента, який буде залучено до процесу збору, обробки та передавання даних. У сучасних умовах, коли популярність Інтернету речей невідпинно зростає, виникає необхідність створювати апаратні рішення, які є одночасно надійними, енергоефективними, масштабованими та економічно доцільними. Саме тому при побудові апаратної частини слід дотримуватись ряду принципів, які забезпечують якісну реалізацію IoT-пристроїв.

Перш за все, ключовим є принцип модульності. Його суть полягає в тому, що кожен функціональний блок системи (мікроконтролер, сенсори, модулі зв'язку, блок живлення тощо) розглядається як окрема модульна одиниця. Це спрощує процес проєктування, дозволяє легко оновлювати або замінювати окремі компоненти без необхідності повної перебудови системи. Наприклад, у разі необхідності замінити сенсор освітлення на точніший — можна змінити лише сам модуль, не торкаючись решти схеми.

Другим важливим принципом є енергоефективність. Оскільки більшість IoT-пристроїв розміщуються у важкодоступних місцях або працюють автономно, з живленням від акумуляторів чи батарей, потрібно ретельно планувати споживання енергії. Тут враховується як вибір мікроконтролера з підтримкою режимів сну, так і оптимізація живлення периферійних пристроїв. Наприклад,

мікроконтролер ESP32 дозволяє використовувати глибокі режими сну, в яких він споживає менше ніж 10 мкА, що значно подовжує час автономної роботи пристрою [17].

Ще одним принципом є простота інтеграції. Компоненти мають бути сумісними за напругою, інтерфейсами та логікою роботи. Це дозволяє мінімізувати час на розробку апаратної частини та зменшити ймовірність помилок під час збирання або тестування. Вибір компонентів із стандартними інтерфейсами, такими як I2C, SPI або UART, значно спрощує з'єднання пристроїв між собою. У межах даної роботи, наприклад, обрано сенсор BH1750, що має цифровий інтерфейс I2C, що робить його ідеальним для підключення до ESP32 без необхідності використання додаткових компонентів узгодження сигналів.

Важливим етапом побудови апаратної частини є врахування умов експлуатації. Якщо система призначена для зовнішнього використання — слід враховувати вплив навколишнього середовища: вологість, пил, температурні коливання. У таких випадках рекомендується використовувати герметичні корпуси, захищені з'єднання та надійне кріплення елементів. Якщо ж система буде розміщена всередині приміщення — пріоритетним стає зменшення розмірів, ваги та споживання енергії.

Не менш важливим принципом є розширюваність — можливість додавання нових функцій або сенсорів без кардинальної зміни структури пристрою. Це досягається завдяки наявності резервних входів/виходів, програмній підтримці нових протоколів, використанню модульного програмного забезпечення. Наприклад, в ESP32 доступна велика кількість GPIO-пінів, що дозволяє в майбутньому безперешкодно підключити нові сенсори або пристрої [18].

У проєктуванні апаратної частини також враховується принцип надійності та відмовостійкості. І хоча більшість недорогих IoT-рішень не передбачає надвисоку ступінь захищеності, навіть у базових реалізаціях потрібно враховувати можливість перезавантаження системи, фільтрацію шумів, захист від короткого замикання, а також можливість резервного живлення. Зокрема, слід передбачити правильне екранування провідників у разі наявності

електромагнітних перешкод або використання стабілізованих джерел живлення з захистом від перенапруги.

Нарешті, слід згадати ще один важливий аспект — вартісну ефективність. Особливо це актуально для великих розгортань IoT-пристроїв, коли потрібно масштабувати рішення на десятки або сотні одиниць. При виборі компонентів потрібно знайти баланс між вартістю, якістю та функціональністю. Завдяки широкому поширенню компонентів, таких як ESP32, BH1750 чи MQ-135, досягається оптимальне співвідношення ціни до якості, що дозволяє будувати ефективні системи без значного збільшення бюджету.

Таким чином, побудова апаратної частини IoT-системи — це багатокомпонентний процес, який потребує глибокого аналізу, прогнозування майбутніх потреб та ретельного добору обладнання. Використання перевірених компонентів, дотримання принципів модульності, енергоефективності, надійності та розширюваності є запорукою створення успішної та довговічної IoT-платформи. У рамках цієї роботи всі ці принципи були враховані при формуванні апаратної частини комплексу моніторингу довкілля на базі ESP32, що дозволило досягти бажаного функціоналу при мінімальних витратах.

1.5 Особливості побудови мережі IoT

Успішне функціонування будь-якої IoT-системи великою мірою залежить не лише від обраного апаратного забезпечення, але й від того, як саме побудована мережева структура, яка забезпечує з'єднання окремих пристроїв між собою та з центральним сервером або хмарною платформою. Побудова мережі в рамках Інтернету речей має низку особливостей, що відрізняють її від класичних комп'ютерних або мобільних мереж, і вимагає специфічного підходу до проектування.

Однією з основних характеристик IoT-мережі є велика кількість підключених пристроїв. Кожен з них може виконувати свою локальну функцію: зчитувати параметри середовища, керувати виконавчими механізмами або просто ретранслювати дані. У такому середовищі необхідно забезпечити не лише

надійний обмін інформацією, але й баланс навантаження, щоб уникнути перевантаження комунікаційних каналів.

Типова IoT-система включає в себе три рівні зв'язку:

- локальний рівень, де пристрої (датчики, контролери) обмінюються інформацією між собою або з локальним хабом через бездротові протоколи — наприклад, Wi-Fi, Bluetooth, Zigbee або LoRa;

- рівень передачі даних у зовнішню мережу — зазвичай реалізується через підключення до інтернету або мобільної мережі, що забезпечує зв'язок із сервером або хмарною платформою;

- хмарний або серверний рівень, де відбувається зберігання, обробка та візуалізація даних.

У межах цієї роботи було обрано протокол Wi-Fi, оскільки мікроконтролер ESP32 має вбудований Wi-Fi-модуль, що дозволяє значно спростити комунікаційну частину без використання додаткових модулів. Це рішення є доцільним при наявності стабільного покриття Wi-Fi, наприклад, у межах будівель, теплиць, лабораторій або інших контрольованих приміщень.

Однією з переваг використання Wi-Fi є висока пропускна здатність, що дозволяє передавати не лише числові значення, а й більш об'ємні дані, наприклад, логи або конфігураційні файли. Також Wi-Fi підтримує двосторонній зв'язок, що дозволяє не тільки отримувати інформацію від сенсорів, а й надсилати команди назад — наприклад, для увімкнення сигналізації або зміни режиму роботи пристрою.

Водночас, Wi-Fi має і недоліки, зокрема — відносно високий рівень енергоспоживання. Тому при побудові мережі з автономними пристроями доцільно реалізовувати механізми оптимізації енергоспоживання: передача даних лише у визначені інтервали, використання глибокого сну між активними сеансами зв'язку, буферизація даних для групової відправки тощо.

Ще одним важливим аспектом побудови IoT-мережі є ідентифікація та адресація пристроїв. Кожен модуль у мережі має мати унікальний ідентифікатор або IP-адресу, що дозволяє коректно маршрутизувати дані. В ESP32 передбачена

підтримка як статичної, так і динамічної адресації через DHCP, а у випадку локальних мереж можна використовувати імена пристроїв (наприклад, через mDNS).

Крім того, необхідно враховувати питання безпеки. Передача екологічних даних може не бути критичною з погляду конфіденційності, однак навіть у таких системах варто реалізовувати базовий рівень захисту — шифрування трафіку наприклад, через HTTPS або TLS, автентифікацію пристроїв, захист доступу до API. ESP32 підтримує SSL-з'єднання, що дозволяє реалізувати захищену передачу даних без потреби у сторонньому апаратному шифруванні [19].

Ще одна характеристика, яку слід враховувати, — відмовостійкість мережі. У разі втрати зв'язку IoT-пристрій повинен бути здатен накопичувати дані локально та відправляти їх повторно, щойно зв'язок буде відновлено. Такий підхід дозволяє уникнути втрати важливої інформації під час перебоїв у мережі.

У рамках цієї роботи мережна частина побудована за схемою: ESP32 збирає інформацію з сенсорів BH1750, MQ-135, підключається до локальної Wi-Fi мережі та надсилає дані у вигляді HTTP-запитів на сервер або хмарну платформу. Це дозволяє реалізувати гнучку та масштабовану архітектуру, яка може бути легко модифікована або розширена в майбутньому.

Таким чином, побудова IoT-мережі — це не просто процес з'єднання пристроїв, а глибоке проектування з урахуванням енергоспоживання, стабільності, безпеки, протоколів зв'язку та типів передачі даних. Правильно спроектована мережа є основою надійної та ефективної роботи будь-якого розумного середовища моніторингу [20].

1.6 Загальне живлення систем IoT

Живлення є одним із ключових аспектів при розробці апаратної частини будь-якої системи Інтернету речей (IoT). Оскільки більшість IoT-пристроїв функціонують автономно, часто у віддалених або важкодоступних місцях, питання джерела живлення та ефективного енергоспоживання стає критичним. Забезпечення надійного, стабільного та довготривалого електроживлення без

частого втручання користувача є запорукою безперервної роботи пристрою, що особливо важливо в системах моніторингу стану навколишнього середовища.

У загальному випадку IoT-система може отримувати електроживлення від трьох основних джерел: мережевого адаптера через стандартне підключення до електромережі, автономного джерела та альтернативного джерела енергії, наприклад, сонячної панелі. Вибір джерела живлення напряму залежить від умов експлуатації, споживчого навантаження пристрою, доступності інфраструктури, кліматичних умов та бажаного періоду автономної роботи [21].

Найпростішим варіантом є живлення IoT-пристрою від стандартної електромережі через адаптер змінного струму. Такий підхід зручний у разі встановлення пристроїв у будівлях або біля інфраструктури з наявними розетками. Однак він повністю унеможливорює мобільність і використання таких пристроїв у польових умовах, де немає підключення до мережі. У таких випадках перевага надається автономному живленню від акумуляторів або батарейок.

Сучасні мікроконтролери, що використовуються в IoT, зокрема ESP32, мають вбудовані механізми зниження енергоспоживання, що дозволяє їм працювати протягом тривалого часу від акумуляторів. Наприклад, режим «deep sleep» ESP32 дозволяє суттєво зменшити споживання енергії, знижуючи струм споживання до кількох мікроампер. Це забезпечує можливість експлуатації пристрою протягом кількох тижнів або навіть місяців на одному заряді акумулятора ємністю, наприклад, 18650 Li-Ion.

Одним з важливих моментів є вибір типу акумуляторів. Найпоширенішими є літій-іонні та літій-полімерні акумулятори. Вони забезпечують високу щільність енергії, мають тривалий термін служби та підтримують багаторазове заряджання. Застосування акумуляторів у поєднанні з сонячними панелями дозволяє створити повністю автономну систему, що підзаряджається вдень і працює вночі. Для цього у схему вводиться контролер заряду, зазвичай типу TP4056 або спеціалізовані енергоменеджери, які забезпечують безпечну експлуатацію акумулятора.

Варто враховувати, що окрім самого мікроконтролера, в IoT-системі працюють ще й сенсори, модулі зв'язку, індикатори або виконавчі пристрої.

Кожен із цих елементів має власні вимоги до живлення. Деякі сенсори можуть працювати лише при напрузі 5 В, тоді як більшість сучасних мікроконтролерів та модулів розраховані на 3.3 В. У зв'язку з цим необхідним є застосування стабілізаторів напруги або перетворювачів, таких як AMS1117, MP1584 чи LDO-регуляторів, які забезпечують необхідну напругу без значних втрат потужності [22].

Окремої уваги заслуговують бездротові модулі зв'язку Wi-Fi, LoRa, Bluetooth, які, незважаючи на короткотривале використання, можуть мати пік споживання струму понад 200 мА під час передачі даних. Тому живлення повинно мати запас потужності та бути достатньо стабільним, аби уникнути скидання мікроконтролера або перешкод у роботі модулів зв'язку. У деяких випадках доцільно використовувати буферні ємності — конденсатори великої місткості, що згладжують скачки напруги.

Ще одним аспектом є моніторинг заряду акумулятора. Багато сучасних мікроконтролерів мають вбудовані АЦП, які дозволяють вимірювати напругу живлення. Це дозволяє відстежувати рівень заряду в реальному часі, виводити попередження про низький заряд або автоматично переводити пристрій у режим енергозбереження.

Також слід згадати про особливості монтажу та захисту джерел живлення. У зовнішніх умовах акумулятори та електроніка повинні бути захищені від вологи, пилу та перепадів температур. Для цього застосовують герметичні корпуси з класом захисту IP65 або вище, спеціальні ущільнення, гідрофобні покриття або навіть системи підігріву для експлуатації в умовах низьких температур.

У підсумку, загальне живлення IoT-системи — це не просто підключення до джерела струму, а повноцінна підсистема, що визначає надійність, автономність та функціональність всієї системи. Вдалий вибір елементів живлення та грамотне енергоменеджмент-проектування дозволяють IoT-пристроєм працювати ефективно в автономному режимі навіть у складних умовах, що особливо важливо для екологічного моніторингу та інших критичних сфер застосування.

У контексті забезпечення живлення особливої уваги заслуговують також

питання оптимізації енергоспоживання всієї системи на рівні програмного забезпечення. Значна частина спожитої енергії припадає саме на передачу даних, тому важливо мінімізувати кількість звернень до мережі та тривалість активного режиму пристрою. Один із поширених методів — використання періодичних циклів роботи пристрою, де більшу частину часу він перебуває у sleep-режимі, а активується лише на короткий час для зчитування показників сенсорів та передачі даних. Такий підхід може зменшити споживання в десятки разів.

Ще одним варіантом є використання енергетично ефективних протоколів передачі даних. Наприклад, у порівнянні з Wi-Fi, протокол LoRa забезпечує передачу даних на великі відстані з дуже низьким енергоспоживанням, хоча й за меншої швидкості. У проєктах, де не потрібна передача великих обсягів інформації, такий підхід є доцільнішим. Протоколи Bluetooth Low Energy (BLE), Zigbee та NB-IoT також орієнтовані на мінімізацію енергозатрат і можуть застосовуватись залежно від конкретних вимог до покриття, пропускну здатності та інфраструктури.

Для досягнення стабільної роботи пристрою необхідно також враховувати характеристики джерел живлення за температурними режимами, зокрема у зовнішніх умовах. Наприклад, літєві акумулятори погано функціонують при низьких температурах, що може призводити до суттєвого зменшення ємності або взагалі до відключення живлення. У таких випадках необхідно застосовувати або спеціальні температуростійкі акумулятори, або реалізовувати підігрів акумуляторного відсіку через резистори, що керуються самим мікроконтролером.

Не менш важливою є система захисту живлення. Апаратний захист повинен передбачати обмеження струму, захист від перенапруги, короткого замикання, зворотної полярності. Для цього використовуються діоди, запобіжники, стабілізатори з вбудованим захистом. У складніших системах реалізується також програмний моніторинг напруги живлення, що дозволяє своєчасно виявити проблеми або викликати аварійне завершення роботи без втрати даних.

Під час проєктування автономної IoT-системи необхідно розрахувати повну енергетичну модель: обчислити середнє та пікове споживання електроенергії,

визначити тривалість роботи між циклами заряджання, вибрати відповідну ємність акумулятора з урахуванням резерву. Наприклад, якщо система споживає в середньому 50 мА, а потрібна автономна робота протягом 7 днів, мінімальна ємність акумулятора повинна бути не менше 8–10 А·год з урахуванням коефіцієнта втрат. Такий підхід дозволяє ще на етапі проєктування зрозуміти доцільність конкретної архітектури живлення.

Крім акумуляторів, усе частіше застосовуються відновлювані джерела енергії — сонячні панелі, вітрогенератори або навіть термоелектричні модулі. Сонячні панелі є найпоширенішим варіантом через простоту встановлення і добру доступність. При правильному розрахунку площі та кута нахилу панелі, пристрій може працювати повністю автономно без потреби ручної зарядки. Втім, така система вимагає додаткових елементів: контролера заряду, захисту акумулятора від надлишкової зарядки чи розрядки, а також стабілізаторів напруги на виході.

Ще одним напрямом, що розвивається, є використання енергії з навколишнього середовища — так звані системи energy harvesting. До таких джерел належать п'єзоелементи, які генерують енергію від вібрацій, чи енергетичні перетворювачі від теплових перепадів. Проте на сьогодні ці технології мають обмежене застосування через малу потужність, яку вони здатні забезпечити, і є більше експериментальними.

Сучасні тенденції у сфері IoT також вказують на потребу у стандартизації джерел живлення для різних класів пристроїв. Це дозволяє створювати універсальні системи зарядки, обслуговування, та навіть енергетичні хаби, до яких підключаються кілька пристроїв. Такі підходи полегшують обслуговування мережі IoT-пристроїв, особливо у великих масштабованих розгортаннях.

З огляду на викладене, можна зробити висновок, що проєктування системи живлення для IoT-пристрою є не менш важливим, ніж вибір мікроконтролера або сенсорів. Це складна інженерна задача, яка вимагає глибокого аналізу умов експлуатації, характеристик навантаження, енергетичних обмежень і сценаріїв використання. Ефективна система живлення не лише продовжує термін автономної роботи пристрою, але й знижує загальну вартість обслуговування,

підвищує надійність і дозволяє реалізувати IoT-рішення у складних умовах, де підключення до мережі є неможливим або недоцільним [23].

1.7 Порівняння існуючих рішень та вибір архітектури для проекту

У сучасному світі існує велика кількість IoT-рішень для моніторингу параметрів довкілля. Ці системи варіюються за масштабом, функціональністю, вартістю, складністю реалізації та рівнем інтеграції в інші інфраструктури. При проектуванні власного апаратно-програмного комплексу виникає необхідність не лише у вивченні наявних розробок, а й у критичному їх аналізі для вибору найоптимальнішої архітектури, що відповідатиме цілям та умовам дипломної роботи.

Серед поширених готових рішень можна виокремити продукти на базі таких платформ, як Arduino, Raspberry Pi, ESP8266/ESP32, STM32, а також більш комерційні варіанти — LoRaWAN-модулі, промислові сенсорні вузли з NB-IoT/4G, або навіть цілі екосистеми від таких компаній, як Siemens, Bosch чи Huawei. Проте більшість із них мають або завищену вартість, або надмірну складність, або ж потребують спеціалізованого ПЗ та сервісів, які не завжди є відкритими або доступними [24].

Аналіз апаратних платформ. Arduino Uno / Nano — надзвичайно популярні плати, особливо в освітніх і прототипових проектах. Проте обмежена тактова частота 16 МГц, мала кількість оперативної пам'яті 2 КБ SRAM і відсутність бездротових модулів на борту не дозволяє вважати їх оптимальними для реалізації сучасного автономного IoT-рішення (рис. 1.1). Для передачі даних Arduino потребує підключення окремих Wi-Fi або GSM-модулів, що ускладнює конструкцію та збільшує енергоспоживання.

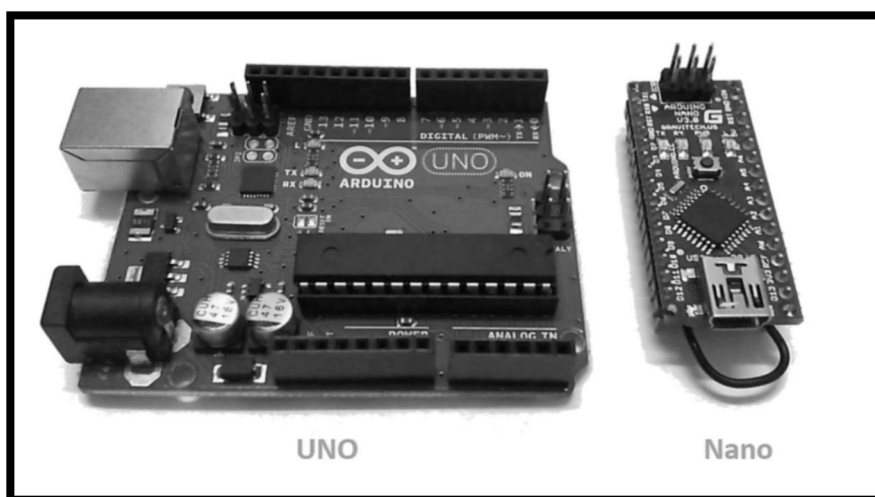


Рисунок 1.1 — Arduino Uno та Arduino Nano

Raspberry Pi має значно вищу обчислювальну потужність, здатна запускати повноцінну операційну систему Linux, має Wi-Fi та Bluetooth (рис. 1.2). Але її головні недоліки — вища вартість, чутливість до живлення та більший розмір. Крім того, для простого моніторингу навколишнього середовища її потужність є надлишковою, що веде до зайвого споживання енергії.



Рисунок 1.2 — Raspberry Pi

ESP8266 — це дешевий Wi-Fi-модуль, здатний працювати як контролер, проте має обмежену кількість пінів, менший обсяг пам'яті порівняно з ESP32, а також слабшу підтримку Bluetooth або інших протоколів (рис. 1.3). Він добре підходить для вузьких задач, проте складніші системи (більше сенсорів, локальна обробка, резервування) він не може ефективно обслуговувати.

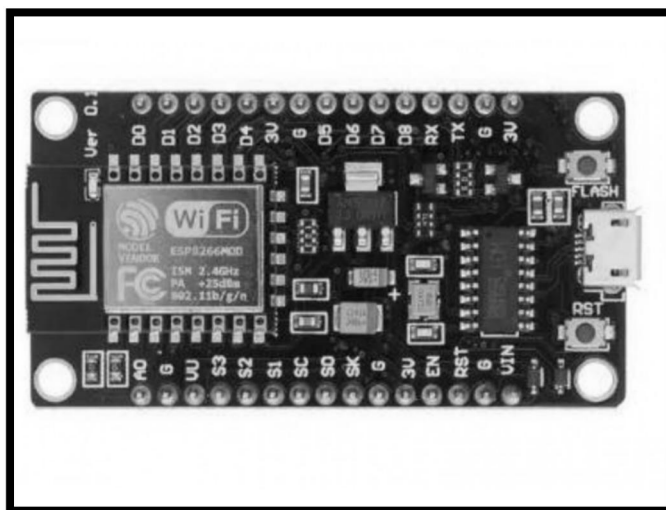


Рисунок 1.3 — ESP8266

ESP32 WROOM — сучасний мікроконтролер від Espressif, який містить два ядра, до 520 КБ SRAM, Wi-Fi, Bluetooth, підтримку багатьох периферійних інтерфейсів I2C, SPI, UART, PWM, ADC, DAC та низьке енергоспоживання (рис. 1.4). Його можна програмувати як на C/C++ через Arduino IDE, PlatformIO, так і на MicroPython. Він є відкритим, широко підтримуваним і має велику кількість прикладів у спільноті розробників.

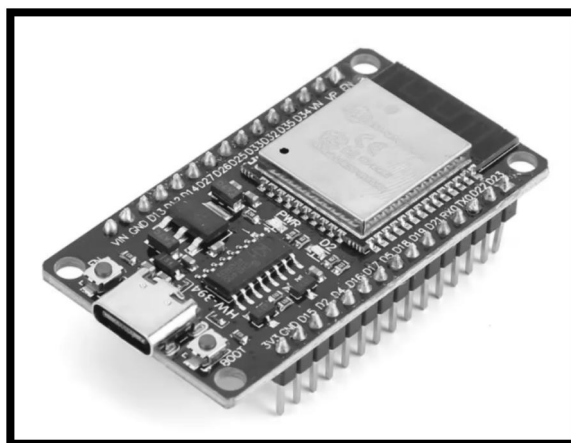


Рисунок 1.4 — ESP32 WROOM

STM32 — професійна платформа на базі ARM Cortex, часто використовується в промисловості. Має високу продуктивність і потужну периферію, але складніша в освоєнні, потребує специфічного програмного забезпечення Keil, CubeMX і часто не має бездротових модулів на борту, що

вимагає додаткових компонентів (рис. 1.5).

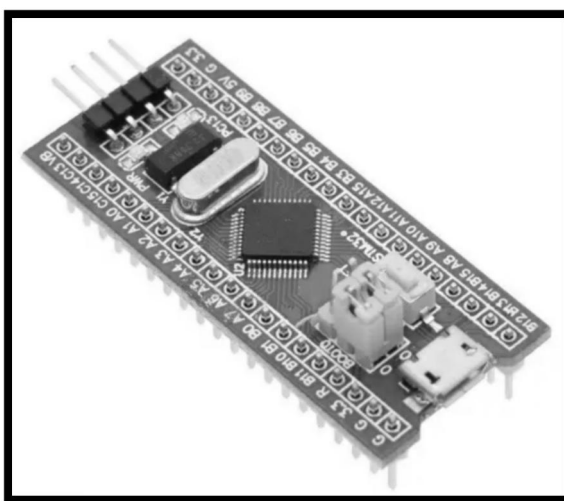


Рисунок 1.5 — STM32

З огляду на перелічене, оптимальним вибором для реалізації даного проєкту було обрано ESP32-WROOM, який поєднує в собі необхідну функціональність, доступність, простоту інтеграції та низьке енергоспоживання.

При виборі архітектури системи моніторингу навколишнього середовища важливо визначити:

- джерела інформації;
- спосіб збирання та обробки даних;
- методи передачі інформації;
- зберігання та відображення результатів.

Для цієї роботи була обрана централізована архітектура з локальною обробкою даних, у якій кожен сенсорний вузол на базі ESP32 самостійно зчитує показники з сенсорів BH1750 — для вимірювання освітленості, MQ-135 — для контролю якості повітря, опрацьовує ці дані. Наприклад, усереднення, фільтрація пікових значень і передає у вигляді HTTP-запитів на віддалений сервер або у хмару. У разі необхідності система може працювати й автономно, зберігаючи результати у внутрішній пам'яті до моменту відновлення з'єднання.

Ця архітектура має такі переваги:

- спрощення з'єднань, одна точка підключення до мережі;
- легка масштабованість, можна додати нові вузли за потреби;

- мінімальне використання ресурсів;
- можливість автономної роботи в разі втрати зв'язку;
- використання відкритих протоколів та стандартних бібліотек.

Таким чином, ретельне порівняння існуючих апаратних платформ і архітектур дозволило обґрунтовано обрати оптимальну конфігурацію для розробки недорогого, ефективного та енергоощадного комплексу моніторингу довкілля. Обрана структура дозволяє забезпечити точність, гнучкість і масштабованість, необхідні для успішного впровадження проєкту як у невеликих, так і у великих середовищах [25].

2 ПРОЄКТУВАННЯ АПАРАТНОГО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ІОТ-СИСТЕМИ МОНІТОРИНГУ

2.1 Загальна структура апаратного комплексу

Розробка сучасної IoT-системи моніторингу стану навколишнього середовища вимагає чітко продуманої структури апаратного забезпечення. Така структура повинна відповідати кільком ключовим критеріям: енергоефективність, надійність, модульність, компактність та здатність до обробки й передачі даних у реальному часі. Система, що розробляється у межах цієї дипломної роботи, створена з урахуванням усіх зазначених вимог і базується на поєднанні сучасного мікроконтролера та чутливих сенсорів, які дозволяють здійснювати комплексний моніторинг параметрів довкілля.

Основою всієї системи є мікроконтролер ESP32-WROOM, який забезпечує керування периферійними пристроями, обробку даних із сенсорів, формування пакетів даних і їх передачу через Wi-Fi-мережу. Завдяки своїм апаратним можливостям, ESP32 виступає не лише в ролі контролера, а й як комунікаційний шлюз, що забезпечує зв'язок з віддаленими серверами, хмарними сховищами або мобільними додатками. Його обчислювальна потужність і наявність бездротових модулів значно спрощують загальну архітектуру, адже відпадає потреба у зовнішньому модулі зв'язку або додатковому мікрокомп'ютері.

До складу апаратного комплексу також входять три сенсори: BH1750, MQ-135 і BMP280. Кожен із них відповідає за вимірювання окремого параметра довкілля. Сенсор BH1750 здійснює вимірювання рівня освітленості, що може бути корисним як для аналізу природного освітлення в реальному часі, так і для інтелектуального керування освітленням у розумних будівлях. Сенсор MQ-135 слугує для визначення концентрації шкідливих домішок у повітрі, таких як аміак, діоксид вуглецю, бензол, спирти тощо. Він забезпечує базову оцінку якості повітря, що є надзвичайно актуальним у сучасних умовах, коли питання екології набувають все більшої значущості. Третій сенсор BMP280 — виконує роль цифрового барометра і термометра. Він дозволяє вимірювати атмосферний тиск і температуру з високою точністю. Це дає змогу не лише контролювати погодні умови, а й прогнозувати зміну кліматичних параметрів на основі аналізу тиску.

Усі сенсори з'єднуються з мікроконтролером за допомогою стандартних інтерфейсів. BH1750 і BMP280 використовують інтерфейс I2C, що дозволяє передавати дані за двома лініями — SDA та SCL, при цьому кілька пристроїв можуть бути підключені до однієї шини. Це спрощує підключення та зменшує кількість необхідних GPIO-портів. Сенсор MQ-135 має аналоговий вихід, тому з'єднується з одним із аналогових входів ESP32, наприклад GPIO36 або GPIO39. У випадку потреби підвищення точності можна використати додатковий АЦП або цифровий фільтр програмно.

Щодо фізичного компонування, то усі елементи розміщуються на макетній платі або спеціально спроектованій друкованій платі. Компактність ESP32 дозволяє мінімізувати розміри пристрою, що особливо важливо у випадках, коли система встановлюється у важкодоступних або обмежених за простором місцях. Для живлення застосовується або стандартне джерело напруги 5 В через порт microUSB, або ж Li-Ion акумулятор із понижувальним перетворювачем напруги. У разі автономної роботи також передбачено використання енергозберігаючих режимів мікроконтролера, таких як Deep Sleep, що дозволяє значно подовжити час автономного функціонування пристрою.

Важливим аспектом є також логічна структура роботи всієї системи. Основні етапи роботи включають: ініціалізацію компонентів, періодичне зчитування даних із сенсорів, попередню обробку результатів, формування пакету інформації і його передавання на сервер або у хмарне середовище. Система може працювати за таймером або у подієвому режимі, реагуючи на зміни параметрів навколишнього середовища понад встановлений поріг.

Загальна структура системи є модульною, що надає можливість розширення функціоналу в майбутньому. Наприклад, без змін основної архітектури можна підключити додаткові сенсори, такі як датчик вологості, модуль GPS для геолокації або датчик шуму. Подібна масштабованість є важливою ознакою сучасних IoT-проектів, адже дозволяє швидко адаптувати систему під нові вимоги без необхідності повної заміни обладнання.

Підсумовуючи вищенаведене, можна зробити висновок, що структура

апаратного комплексу є логічно обґрунтованою, технічно доцільною і відкритою до подальших модифікацій. Вона забезпечує повноцінний збір та передачу екологічних даних, відповідає сучасним вимогам до IoT-пристроїв і має потенціал до практичного застосування в реальних умовах — як у побуті, так і в промисловості чи муніципальній сфері.

2.2 Вибір мікроконтролера ESP32-WROOM

Вибір мікроконтролера є ключовим етапом у процесі проєктування будь-якої IoT-системи. Саме цей компонент виконує функції центрального обчислювального вузла, обробляє вхідні сигнали із сенсорів, керує периферією, здійснює зв'язок з іншими пристроями та забезпечує логіку роботи всієї системи. У межах цієї дипломної роботи було прийнято рішення використовувати мікроконтролер ESP32-WROOM як основну обчислювальну платформу. Такий вибір є обґрунтованим як з технічної, так і з економічної точки зору.

ESP32 — це 32-бітний мікроконтролер із подвійним ядром Xtensa LX6, розроблений компанією Espressif Systems, яка є одним із провідних гравців у сфері виробництва мікроконтролерів для бездротових рішень (рис. 2.1). Платформа ESP32 прийшла на зміну популярному ESP8266, успадкувавши від нього базову концепцію, але отримавши набагато ширші можливості: вищу продуктивність, збільшену кількість входів/виходів, розширену підтримку протоколів зв'язку, знижене енергоспоживання та покращену стабільність роботи [25].

Однією з головних переваг ESP32 є наявність вбудованого модуля Wi-Fi та Bluetooth/BLE, що дозволяє реалізувати бездротовий зв'язок без додаткових зовнішніх модулів. Це значно спрощує схему з'єднання, зменшує фізичні розміри пристрою та підвищує його енергоефективність. У контексті IoT-системи моніторингу навколишнього середовища, такий функціонал відкриває можливість оперативного передавання зібраних даних у локальну або хмарну інфраструктуру, зберігаючи при цьому мобільність пристрою.

Ще однією перевагою є висока обчислювальна потужність. Два ядра, що

працюють на частоті до 240 МГц, дозволяють ефективно обробляти вхідні дані в реальному часі, виконувати багатозадачні операції, реалізовувати складну логіку прийняття рішень. Для порівняння, більшість традиційних мікроконтролерів наприклад, AVR-серії від Microchip, таких як ATmega328 мають значно менші можливості, не підтримують багатозадачність і не мають вбудованого бездротового зв'язку.

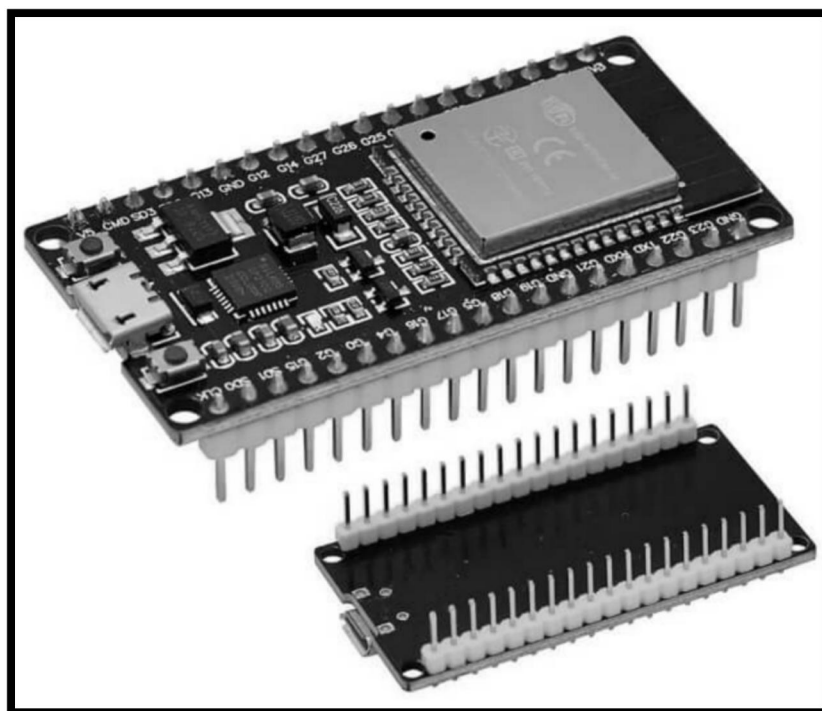


Рисунок 2.1 — ESP32-WROOM

Обсяг оперативної пам'яті SRAM становить 520 КБ, а флеш-пам'яті — 4 МБ у стандартному модулі ESP32-WROOM-32, що достатньо для роботи з кількома сенсорами, зберігання буферів даних, використання обробки сигналів, реалізації власного вебінтерфейсу або MQTT-клієнта. Крім того, модуль підтримує розширення пам'яті через SPI-Flash, а також роботу з файловими системами (SPIFFS, LittleFS), що дозволяє локально зберігати логи, конфігураційні файли або вебсторінки.

ESP32 також має великий набір периферійних інтерфейсів, серед яких:

- I2C, який використовується для підключення сенсорів BH1750 і BMP280;
- SPI — для високошвидкісного обміну даними;

- UART — для серійного з'єднання з іншими пристроями;
- ADC аналогово-цифровий перетворювач, необхідний для зчитування даних з аналогового сенсора MQ-135;

- PWM, DAC, CAN, IR, а також підтримка сенсорних датчиків і SD-карт.

Іншою важливою особливістю є підтримка режимів енергозбереження: *light sleep*, *deep sleep* та *hibernation*. У *deep sleep* режимі ESP32 споживає лише кілька мікроампер, що робить його ідеальним варіантом для автономних систем, які працюють на акумуляторі або батареї. У контексті екологічного моніторингу, де система має періодично «прокидатися», знімати показники та знову засинати — це надзвичайно важливо для економії енергії.

Ще однією перевагою ESP32 є дружнє середовище розробки. Він підтримується популярною Arduino IDE, що дозволяє швидко та зручно писати й тестувати код, навіть якщо розробник не має великого досвіду у вбудованому програмуванні. Крім того, доступні офіційні SDK — ESP-IDF (IoT Development Framework), який відкриває значно ширші можливості для професійної розробки, включаючи роботу з FreeRTOS, реалізацію складних мережевих протоколів та інтеграцію з хмарними платформами.

Серед інших причин вибору ESP32 можна також зазначити:

- широку підтримку в інтернет-спільноті: тисячі прикладів, бібліотек, документації, відеоуроків та форумів;
- високу надійність і стабільність роботи в тривалому циклі;
- низьку ціну при високому рівні функціональності — модуль можна придбати за ціною від 3 до 6 доларів США, що робить його доступним навіть для студентських або дослідницьких проєктів.

Не менш важливим є формфактор. Модуль ESP32-WROOM-32 має компактний розмір приблизно 25.5мм × 18мм і може бути встановлений на стандартні плати розробника *dev-board*, такі як ESP32 DevKitC, що забезпечують легке підключення до комп'ютера через USB, а також виводи для доступу до всіх GPIO. Такий підхід дозволяє швидко створювати прототипи, тестувати функціональність і здійснювати налагодження з використанням стандартного

інструментарію.

Таким чином, вибір ESP32-WROOM є цілком виправданим: він задовольняє всі технічні вимоги системи, забезпечує гнучкість, масштабованість і відкриває широкі можливості для розвитку та вдосконалення проєкту.

Багатофункціональність, підтримка бездротових технологій, потужна периферія та підтримка сучасних середовищ розробки дозволяють ефективно реалізувати як прості, так і складні IoT-рішення з мінімальними витратами часу та ресурсів.

2.3 Електроні компоненти

2.3.1 Характеристика давача BH1750 та його функціонального призначення

У системах моніторингу навколишнього середовища освітленість є одним із важливих параметрів, що впливає на життєдіяльність людей, рослин, тварин і технологічні процеси. Наприклад, рівень освітленості у приміщеннях впливає на продуктивність праці, а в сільському господарстві на фотосинтез. Тому доцільним є використання відповідних сенсорів, що дозволяють точно та надійно вимірювати інтенсивність світлового потоку. У межах даної роботи для реалізації цієї функції обрано сенсор BH1750, який поєднує в собі високу точність, простоту використання та низьке енергоспоживання.

Сенсор BH1750 розроблений компанією ROHM Semiconductor і є цифровим фотометричним датчиком, що вимірює рівень освітленості в одиницях люксів lx. Це одна з ключових переваг перед аналоговими датчиками, які потребують додаткового аналого-цифрового перетворення та калібрування. BH1750 має вбудований аналого-цифровий перетворювач та цифровий інтерфейс I2C, що забезпечує зручне та швидке зчитування даних без значного програмного або апаратного навантаження на мікроконтролер.

Конструктивно BH1750 складається з фотодіода, операційного підсилювача, АЦП і цифрового інтерфейсу (рис. 2.3). Діапазон вимірювань становить від 1 до 65 535 люксів, що дозволяє охопити як умови майже повної темряви, так і пряме сонячне світло. Сенсор має два режими роботи: високої точності High Resolution Mode та низької точності Low Resolution Mode. У першому режимі сенсор

забезпечує вищу роздільну здатність 1 lx, але потребує більше часу для зчитування даних до 180 мс. У другому режимі зменшується точність до 4 lx, проте значно скорочується час вимірювання, що корисно у випадках, коли необхідно швидко реагувати на зміну умов [8].

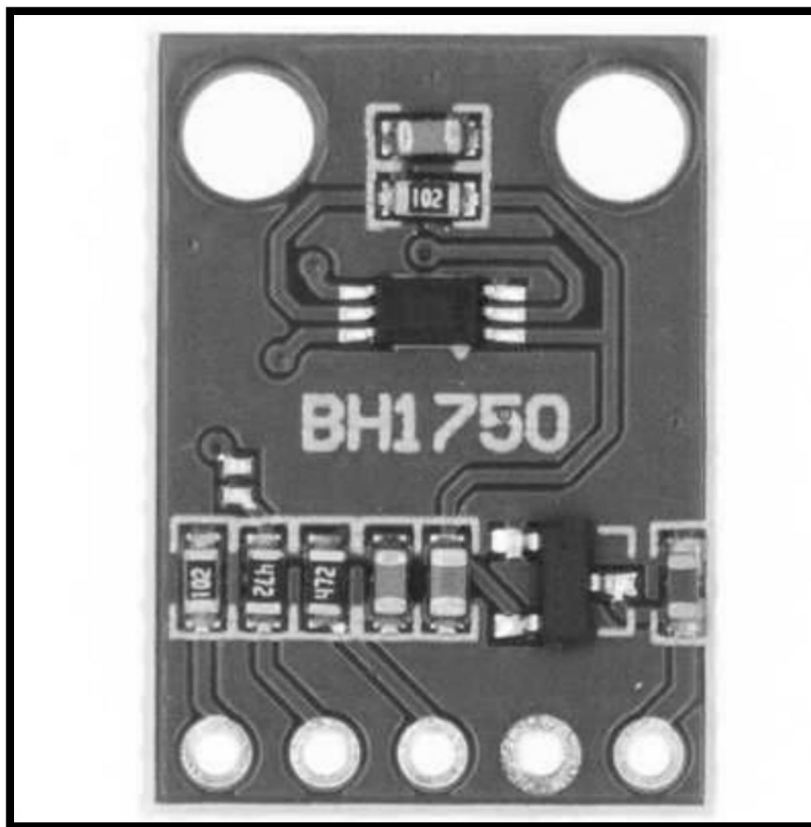


Рисунок 2.3 — Давач BH1750

Однією з особливостей BH1750 є наявність вбудованої компенсації спектру світла, наближеної до характеристик людського ока. Це означає, що сенсор найбільш чутливий до видимого світла довжина хвилі близько 560 нм і менш чутливий до інфрачервоного та ультрафіолетового діапазонів. Така особливість робить його придатним для систем освітлення, моніторингу робочих умов або контролю денного світла в приміщеннях. Наприклад, BH1750 можна використовувати в розумному будинку для автоматичного керування шторами, освітленням або вентиляцією, в залежності від зовнішніх умов.

Підключення BH1750 до мікроконтролера ESP32 здійснюється за допомогою інтерфейсу I2C, який передбачає два сигнальні дроти: SCL Serial Clock та SDA Serial Data. Це дозволяє використовувати лише два виводи

мікроконтролера для зв'язку з кількома пристроями, що особливо корисно в умовах обмеженої кількості GPIO. Адреса пристрою в I2C-шині зазвичай дорівнює 0x23 або 0x5C, що залежить від підключення лінії ADDR до логічного рівня 0 або 1. Це дозволяє підключати декілька сенсорів до однієї шини, змінюючи їхню адресу.

Однією з практичних переваг BH1750 є простота програмування. Для роботи з ним існує безліч бібліотек для Arduino IDE, включаючи BH1750.h, які дозволяють швидко ініціалізувати пристрій, зчитати показники освітленості в люксах та інтегрувати їх у загальну логіку програми.

Завдяки цій простоті розробник може зосередитися на реалізації логіки роботи всієї системи, а не на налагодженні роботи самого сенсора. Це значно скорочує час розробки прототипу й підвищує надійність роботи IoT-пристрою.

У плані енергоспоживання BH1750 є досить економічним. У активному режимі споживання струму становить приблизно 0,12 мА, а в режимі очікування — лише 0,01 мА. Це дозволяє використовувати його в автономних пристроях, які живляться від батареї або акумулятора. До того ж, сенсор має функцію програмного вимикання, що дозволяє додатково економити енергію в періоди, коли зчитування даних не потрібне.

Ще одним важливим аспектом є надійність роботи BH1750 у різних умовах освітлення. Сенсор має хорошу лінійність у всьому діапазоні вимірювання, що забезпечує точне відображення змін інтенсивності світла. Наприклад, перехід від яскравого освітлення до темряви або навпаки не спричиняє затримки чи спотворень у показниках. Така стабільність робить його придатним для тривалого використання в польових умовах або в інсталяціях, де потрібен безперервний моніторинг.

BH1750 також відзначається малою залежністю від температури та вологості, що дозволяє використовувати його як у приміщенні, так і на відкритому повітрі. Діапазон робочих температур становить від -40°C до $+85^{\circ}\text{C}$, що дозволяє використовувати сенсор в умовах помірного або навіть екстремального клімату. У контексті моніторингу стану навколишнього

середовища це надзвичайно важливо, оскільки дозволяє зберігати стабільність вимірювань навіть при змінній погоді чи перепадах температур [8].

2.3.2 Характеристика давача MQ-135 та його функціонального призначення

Забруднення повітря стало однією з найгостріших проблем сучасного світу. У великих містах рівень шкідливих домішок часто перевищує допустимі норми, що безпосередньо впливає на стан здоров'я населення. У зв'язку з цим моніторинг якості повітря є важливою складовою екологічного нагляду, планування міського розвитку, побудови систем контролю в промислових зонах та житлових приміщеннях. У цій дипломній роботі для реалізації вимірювання якості повітря використовується сенсор MQ-135, який призначений для виявлення ряду шкідливих газів у повітрі.

Сенсор MQ-135 є газоаналізатором (рис. 2.4), чутливим до таких речовин, як аміак, діоксид азоту, бензол, дим, спирти, а також оксид вуглецю та деякі інші леткі органічні сполуки (VOC). Він працює на основі напівпровідникового матеріалу, найчастіше оксиду олова, який змінює свою провідність залежно від концентрації газу в повітрі. У чистому повітрі провідність сенсора мінімальна, але при наявності шкідливих газів опір падає, що дозволяє зафіксувати зміну та визначити концентрацію речовини.

Конструкція MQ-135 включає нагрівальний елемент, що підтримує стабільну робочу температуру від 200°C до 300°C, а також сітчасту захисну оболонку з нержавіючої сталі, яка забезпечує захист від пилу та механічних пошкоджень. Елемент має чотири виводи: два для живлення нагрівача H та два для вимірювання опору A та B. У більшості модулів на основі MQ-135 також інтегровано компаратор, аналоговий вихід AO та цифровий вихід DO, що дає змогу використовувати як аналогові, так і порогові цифрові сигнали для фіксації перевищення певного рівня концентрації [7].

Однією з ключових переваг MQ-135 є його універсальність. Він здатен реагувати на велику кількість шкідливих речовин, що робить його придатним для загального моніторингу повітря, особливо у випадках, коли точне визначення

конкретного газу не є критичним. Таким чином, MQ-135 часто застосовується в побутових системах моніторингу якості повітря, в системах вентиляції та сигналізації, в проектах на базі Arduino та ESP32, а також у портативних приладах.

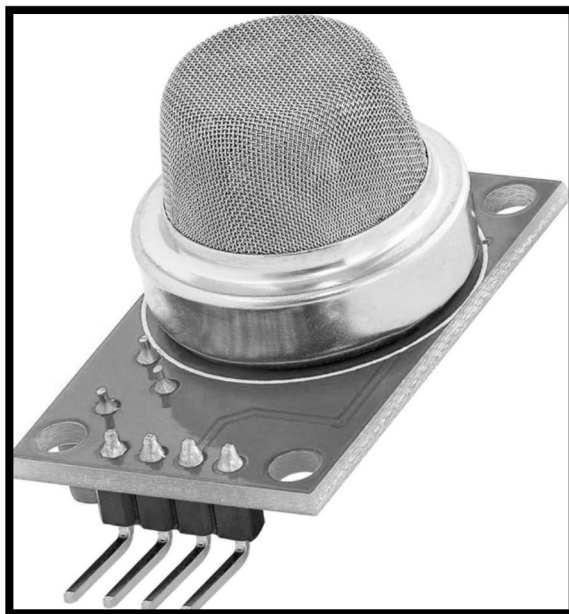


Рисунок 2.4 — Давач MQ-135

Проте сенсор має й певні обмеження, які слід враховувати. Зокрема, він потребує калібрування. Початкове калібрування полягає у визначенні базового опору R_0 сенсора в умовах чистого повітря. У подальшому вимірювання проводиться шляхом розрахунку співвідношення R_S/R_0 де R_S — опір сенсора при поточному вимірюванні. Отримане значення співвідноситься з графіками залежності для різних газів, які надаються в документації до сенсора. Важливо зазначити, що MQ-135 має невисоку селективність, тобто не здатен однозначно визначити тип конкретного газу без додаткової інформації або обробки сигналів. Саме тому в багатьох системах використовуються кілька різних сенсорів для досягнення більшої точності.

Підключення MQ-135 до ESP32 є досить простим. У випадку використання аналогового виходу АО — його можна з'єднати з будь-яким аналоговим піном ESP32, оскільки цей мікроконтролер підтримує вбудований 12-бітний аналого-цифровий перетворювач. У випадку, якщо використовується цифровий вихід DO,

потрібно попередньо встановити поріг спрацювання за допомогою потенціометра на модулі. При перевищенні цього порогу на виході буде логічний сигнал 1, що дозволяє швидко зреагувати, наприклад, запустити сигналізацію або ввімкнути вентиляцію.

2.3.3 Характеристика давача BMP280 та його функціонального призначення

У контексті сучасних IoT-систем, спрямованих на моніторинг навколишнього середовища, особливої уваги заслуговують датчики, які вимірюють параметри атмосфери — зокрема температуру та атмосферний тиск. Одним із найпопулярніших і технічно досконалих датчиків такого типу є BMP280, розроблений компанією Bosch Sensortec. Цей сенсор використовується для точного вимірювання тиску та температури, що дозволяє реалізовувати широкий спектр прикладних задач, починаючи від метеорологічних спостережень і закінчуючи системами навігації.

BMP280 є цифровим сенсором, який поєднує у собі барометричний датчик тиску та термометр (рис. 2.5). Важливою особливістю BMP280 є те, що він пропонує високу точність, низьке енергоспоживання і невеликі розміри, що робить його ідеальним для інтеграції у компактні, автономні IoT-пристрої. Завдяки цьому датчик широко застосовується в різних сферах — від носимих гаджетів і смартфонів до систем моніторингу довкілля та пристроїв розумного дому.

Однією з основних функцій BMP280 є вимірювання атмосферного тиску з точністю до ± 1 гПа. Це дозволяє з високою точністю визначати зміни погодних умов, прогнозувати погоду, а також визначати висоту над рівнем моря, що особливо важливо для навігаційних систем. Вимірювання температури, здійснюване датчиком, також відбувається з високою точністю і використовується для корекції показників тиску, а також для безпосереднього контролю температурного режиму навколишнього середовища.

Для зв'язку з мікроконтролером BMP280 використовує цифрові інтерфейси I2C або SPI, що дає можливість гнучко інтегрувати датчик у різні апаратні

конфігурації. Завдяки малому споживанню енергії BMP280 можна застосовувати у пристроях, які працюють від батарей або акумуляторів, забезпечуючи довготривалу автономність.

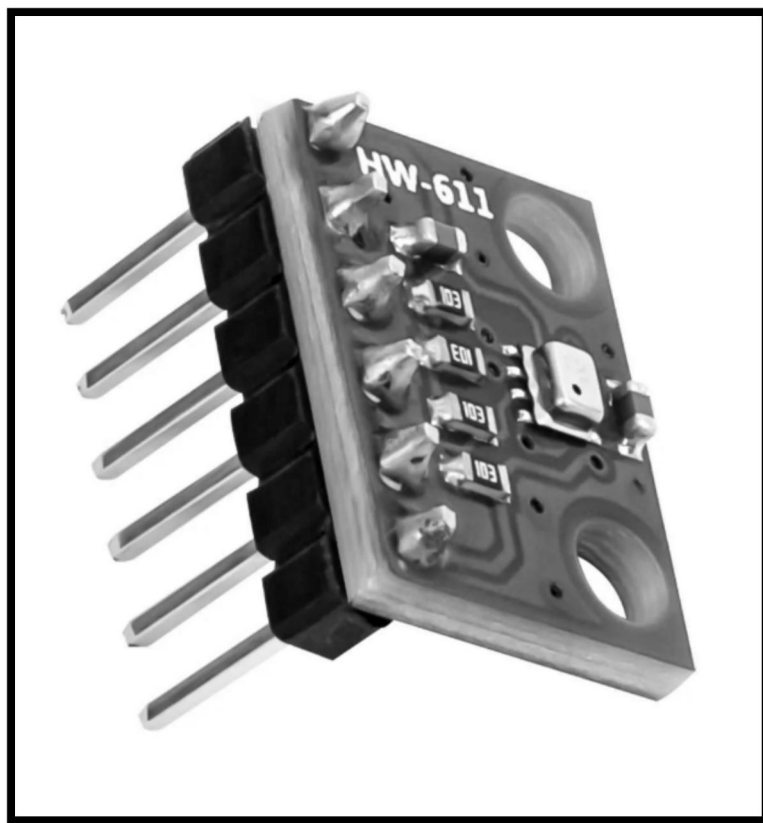


Рисунок 2.5 — Давач BMP280

Конструктивно сенсор BMP280 має компактний корпус розміром 3,0мм x 3,8мм x 1,0 мм, що дозволяє легко розміщувати його навіть у пристроях із обмеженим простором. На внутрішньому рівні датчик складається з п'єзорезистивного елемента для вимірювання тиску та терморезистивного елемента для температурних вимірювань, які вбудовані в одну мікросхему. Таке поєднання забезпечує високу точність і стабільність показників.

Важливим аспектом при використанні BMP280 є необхідність калібрування. Кожен датчик постачається з унікальними коефіцієнтами калібрування, записаними у внутрішню пам'ять, які мікроконтролер повинен враховувати для отримання точних вимірювань. Для цього у прошивці системи моніторингу реалізуються алгоритми обробки сирих даних, що перетворюють їх у коректні значення температури і тиску.

Застосування BMP280 у системах моніторингу навколишнього середовища дозволяє отримувати надійні дані про зміну погодних умов, атмосферного тиску та температури, що є критично важливим для оцінки стану довкілля. Наприклад, у системах контролю якості повітря інформація про атмосферний тиск допомагає коректно інтерпретувати показники газових сенсорів, оскільки тиск впливає на розподіл газів у повітрі.

Крім того, BMP280 застосовується для створення розумних метеостанцій, які можуть автономно працювати тривалий час, передаючи зібрані дані в хмарні сервіси для подальшої аналітики. В умовах IoT такі пристрої можуть інтегруватися у більші системи збору даних, дозволяючи відслідковувати екологічний стан у режимі реального часу.

У підсумку, BMP280 є одним із найефективніших датчиків атмосферного тиску та температури для IoT-проектів, що дозволяє поєднувати точність вимірювань, компактність та енергоефективність. Його використання у проекті апаратної частини системи моніторингу навколишнього середовища є виправданим та перспективним, оскільки забезпечує якісний збір базових метеорологічних даних, необхідних для комплексного аналізу екологічних умов.

2.4. Побудова системи живлення апаратного комплексу

2.4.1 Підвищуючий/знижуючий перетворювач 5V 1A S7V8F5 від Pololu

В сучасних IoT-системах одним із найважливіших аспектів є надійне та ефективне живлення всіх електронних компонентів. Оскільки різні пристрої можуть працювати при різних рівнях напруги, необхідно забезпечити стабільне перетворення напруги із одного рівня в інший. У нашому проекті для живлення мікроконтролера ESP32 та датчиків обрана напруга 3.3 В, тоді як основне джерело живлення — акумуляторна батарея типу 18650, яка має номінальну напругу приблизно 3.7 В і максимальну напругу зарядки 4.2 В. Це створює певні вимоги щодо стабілізації та перетворення напруги для коректної роботи всіх елементів системи.

Для ефективного живлення використовується підвищуючий/знижуючий

перетворювач Pololu S7V8F5 (рис. 2.6), який здатен працювати при вхідних напругах від 2.7 В до 11.8 В і стабільно видавати 5 В при струмі до 1 ампера. Цей пристрій є DC-DC конвертором типу buck-boost, що означає, що він може як підвищувати, так і знижувати напругу в залежності від вхідного рівня.

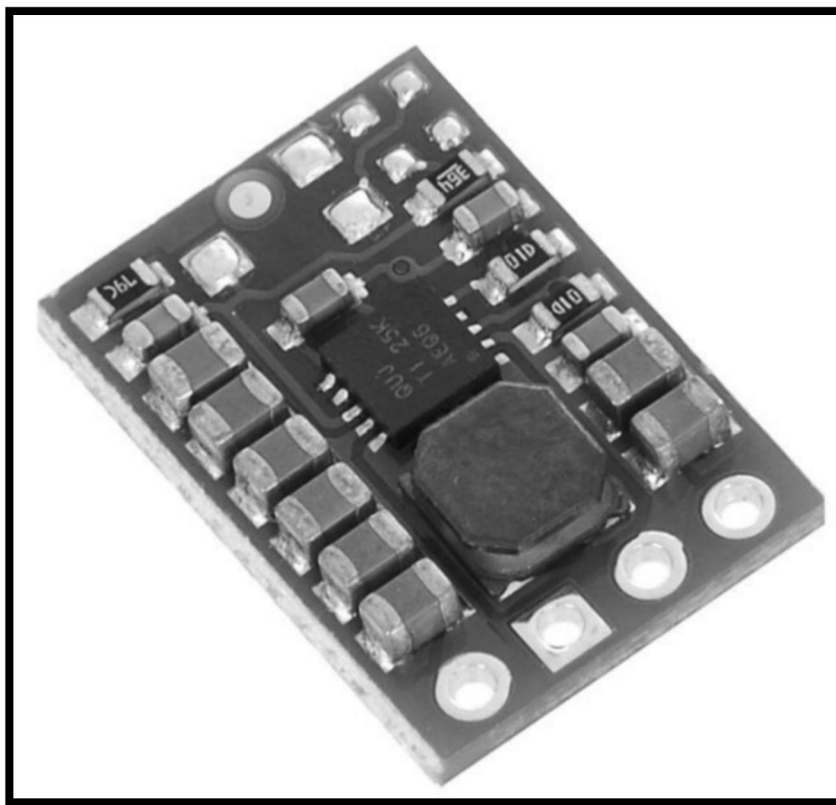


Рисунок 2.6 — Підвищуючий/знижуючий перетворювач 5В 1А S7V8F5 від Pololu

Використання саме такого типу перетворювача зумовлено тим, що напруга батареї 18650 змінюється у широких межах залежно від стану заряду: від повністю зарядженої (приблизно 4.2 В) до розрядженої (близько 3.0 В). Якщо використовувати традиційний стабілізатор лінійного типу або просто понижуючий DC-DC конвертор, то при напрузі нижчій за необхідні 5 В живлення буде нестабільним або зовсім відсутнім. У нашому випадку важливо, щоб пристрої отримували стабільні 5 В, адже саме ця напруга живлення потрібна для багатьох компонентів, наприклад, USB-модулів або зовнішніх периферійних пристроїв.

Принцип роботи підвищуючого/знижуючого перетворювача заснований на

керуванні ключем, індуктивністю, діодом та конденсаторами, що утворюють резонансний контур. У процесі роботи індуктивність накопичує енергію під час замикання ключа і віддає її при його відкриванні, що дозволяє змінювати рівень вихідної напруги незалежно від вхідної. Перевагою такого рішення є високий ККД (коефіцієнт корисної дії) — зазвичай понад 85%, що значно знижує теплові втрати і продовжує час автономної роботи від акумулятора.

Конкретна модель Pololu S7V8F5 має компактні розміри, низький рівень шумів на виході, вбудований захист від коротких замикань і перевантажень по струму, а також функцію автоматичного відключення при надмірному нагріванні. Це робить її ідеальним вибором для портативних IoT-пристроїв, де важлива надійність і безпека експлуатації.

Підключення перетворювача у схемі відбувається між джерелом живлення батареєю 18650 та шиною 5 В, від якої живляться всі відповідні модулі та компоненти. Вихід 5 В далі може жити стабілізатор 3.3 В для ESP32 та інших сенсорів, які працюють при нижчій напрузі.

У процесі розробки апаратної частини було проведено низку тестів для визначення поведінки перетворювача при різних рівнях заряду батареї, навантаженнях і температурних умовах. Результати показали стабільність вихідної напруги в межах допусків, низький рівень шуму, а також високу ефективність роботи. Ці фактори є критично важливими, оскільки нестабільне живлення призводить до збоїв у роботі мікроконтролера, втрати даних та пошкодження обладнання.

Крім технічних характеристик, важливим аспектом є простота інтеграції цього перетворювача в проєкт. Завдяки стандартним розмірам і типорозміру SMD, модуль легко монтується на друковану плату, що полегшує виготовлення пристрою та скорочує час розробки. Високий рівень захисту від електричних впливів дозволяє використовувати його в різних умовах експлуатації — від домашнього середовища до зовнішніх автономних станцій моніторингу.

Таким чином, використання підвищуючого/знижуючого перетворювача S7V8F5 від Pololu є ключовим елементом у забезпеченні стабільного живлення

IoT-системи. Воно дозволяє зберегти компактність, енергоефективність і надійність пристрою, що особливо важливо для автономних і мобільних рішень, які застосовуються для моніторингу навколишнього середовища.

2.4.2 Живлення від батареї 18650

Живлення IoT-системи є одним із найважливіших аспектів її стабільної та довготривалої роботи, особливо якщо мова йде про автономні пристрої, розташовані у віддалених або важкодоступних місцях. У цьому контексті використання акумуляторних батарей типу 18650 є оптимальним рішенням, оскільки вони поєднують у собі високу енергетичну щільність, тривалий термін служби, компактні розміри та прийнятну вартість.

Акумулятори 18650 представляють собою літій-іонні батареї циліндричної форми з номінальною напругою від 3.6 В до 3.7 В та ємністю, що зазвичай коливається в межах від 1800 до 3500 мА·год, залежно від виробника та моделі (рис. 2.7). Завдяки своїм характеристикам, такі батареї здатні забезпечити живлення електронних пристроїв з високим енергоспоживанням протягом тривалого часу.



Рисунок 2.7 — Літій-іонна батарея 18650

Однією з головних переваг батарей 18650 є їхня здатність витримувати

велику кількість циклів заряджання та розряджання (від 300 до 500 повних циклів без значного зниження ємності). Це робить їх особливо привабливими для IoT-пристроїв, які повинні працювати автономно протягом тривалого періоду без заміни джерела живлення [26].

Проте, для ефективного використання акумулятора 18650 у схемі живлення IoT-системи необхідно враховувати особливості його експлуатації. Літій-іонні батареї мають строгі вимоги щодо заряджання та розряджання: надмірне розряджання може призвести до необоротного пошкодження елемента, тоді як перенапруга під час заряджання створює ризик загоряння або вибуху. Тому для забезпечення безпеки застосовуються спеціальні модулі захисту, які контролюють параметри роботи батареї, запобігаючи надмірній напрузі, струму та температурі.

У контексті IoT-системи моніторингу, де часто потрібна автономність та мобільність, батарея 18650 з модулями захисту PCM — Protection Circuit Module дозволяє створити надійне та безпечне джерело живлення. Додатково використання підвищуючих/знижуючих перетворювачів, таких як Pololu S7V8F5, забезпечує стабільну вихідну напругу незалежно від рівня заряду акумулятора.

Важливою перевагою батарей 18650 є їх сумісність із зарядними пристроями, які широко доступні на ринку, а також можливість заряджання від різних джерел живлення — від звичайної мережі змінного струму через адаптер до сонячних панелей, що робить такі акумулятори перспективними для використання у автономних IoT-пристроях з енергозбереженням.

Ще один аспект, який необхідно враховувати при проєктуванні системи живлення — це можливість паралельного або послідовного з'єднання декількох батарей для збільшення ємності або напруги відповідно. У нашому випадку, оскільки живлення подається на перетворювач 5 В, використовується одна батарея 18650 з оптимізованим контролем заряду.

Для подовження часу роботи IoT-системи застосовуються додаткові засоби енергозбереження, наприклад, переведення мікроконтролера ESP32 у режими глибокого сну (deep sleep), коли пристрій споживає мінімальну кількість енергії в моменти відсутності активних вимірювань чи передачі даних. Поєднання таких

апаратних і програмних рішень дозволяє досягти максимальної автономності роботи системи.

Отже, застосування батареї 18650 як джерела живлення у поєднанні з ефективним перетворювачем напруги та системою контролю заряджання і розряджання забезпечує оптимальний баланс між компактністю, надійністю та енергоефективністю. Це дозволяє створювати автономні IoT-системи, здатні довго працювати без заміни батарей або підзарядки, що є особливо важливим для систем моніторингу навколишнього середовища у віддалених місцях або складних умовах експлуатації.

2.5 Компонування системи

Проектування апаратної частини IoT-системи передбачає не лише правильний вибір окремих компонентів, а й їх коректне та надійне з'єднання для забезпечення стабільної роботи системи. З'єднання компонентів є критично важливим етапом, оскільки від нього залежить коректність передачі сигналів, живлення та комунікації між усіма елементами апаратного комплексу.

У розглянутій системі моніторингу основними складовими є мікроконтролер ESP32-WROOM, сенсори BH1750, MQ-135 та BMP280, джерело живлення на базі батареї 18650, а також підвищуючий/знижуючий перетворювач напруги. Кожен з цих компонентів має свої специфічні електричні інтерфейси, стандарти підключення та вимоги до харчування, які необхідно врахувати при з'єднанні.

Мікроконтролер ESP32-WROOM володіє великою кількістю універсальних входів/виходів GPIO, що дозволяє підключити кілька периферійних пристроїв одночасно. Для комунікації з сенсорами BH1750 та BMP280 використовується інтерфейс I2C, що дозволяє підключати кілька пристроїв до однієї пари ліній даних SDA та SCL. Важливо при цьому належним чином налаштувати адреси пристроїв, щоб уникнути конфліктів на шині. Інтерфейс I2C також вимагає використання підтягувальних резисторів на лініях SDA і SCL, що забезпечують стабільність сигналу.

Сенсор MQ-135 має аналоговий вихід, що виводить напругу, пропорційну концентрації газів у повітрі. Для підключення цього сенсора використовується один із аналогових входів ESP32, що забезпечує вимірювання рівня напруги та подальшу цифрову обробку. Крім аналогового виходу, MQ-135 може мати цифрові сигнали тривоги, які підключаються до цифрових входів мікроконтролера, якщо потрібно визначати перевищення встановлених порогів.

Живлення всіх компонентів організоване через підвищуючий/знижуючий перетворювач напруги Pololu S7V8F5, який стабілізує вихідну напругу на рівні 5 В незалежно від рівня заряду батареї 18650. Оскільки мікроконтролер ESP32 та сенсори працюють на напрузі 3.3 В, перетворювач має також можливість знижувати напругу до необхідного рівня. Правильне забезпечення живлення — це гарантія стабільної роботи та відсутності збоїв, які можуть виникати через нестабільність напруги.

Для коректної роботи системи важливо дотримуватись рекомендацій виробників щодо максимальної довжини проводів, екранування, а також правильного розташування компонентів на платі. Занадто довгі або погано екранізовані з'єднання можуть призводити до шумів та перешкод у сигналах, що особливо критично для аналогових входів та високочутливих сенсорів.

Крім того, при розробці з'єднань необхідно враховувати умови експлуатації системи. Якщо пристрій встановлюється на відкритому повітрі або у вологих приміщеннях, слід забезпечити захист контактів від корозії та коротких замикань, наприклад, за допомогою герметичних роз'ємів або силіконових герметиків.

Для програмної частини важливо реалізувати логіку ініціалізації та перевірки підключення сенсорів, адже неправильне з'єднання або пошкодження ліній можуть викликати помилки при зчитуванні даних. При цьому корисно використовувати резервні стратегії обробки помилок, наприклад, повторні спроби опитування або повідомлення користувачу про несправність.

2.6 Відлагодження системи

Перевірка працездатності апаратного комплексу IoT-системи моніторингу

стану навколишнього середовища є одним із ключових етапів у процесі розробки та впровадження такого пристрою. Вона покликана підтвердити, що всі компоненти системи коректно взаємодіють між собою, а зібрані дані є достовірними, стабільними та можуть бути використані для подальшого аналізу та прийняття рішень. В умовах сучасних IoT-рішень особливу увагу приділяють не лише функціональності, але й енергоефективності, надійності та стійкості апаратної платформи до зовнішніх впливів.

Перевірка працездатності починається з тестування кожного окремого сенсора, який входить до складу апаратного комплексу. Для датчика освітленості BH1750 характерна робота через цифровий інтерфейс I2C, що забезпечує високу точність і стабільність вимірювань. Важливо перевірити, чи правильно встановлено адресу пристрою, а також чи коректно відбувається зчитування даних про рівень освітленості. Випробування проводяться за різних рівнів освітлення, від повної темряви до яскравого денного світла. У процесі цих тестів фіксуються значення освітленості, які потім порівнюють з еталонними або контрольними вимірюваннями, отриманими за допомогою професійного люксметра. Також тестують реакцію BH1750 на раптові зміни освітлення, що дає змогу оцінити швидкість оновлення показників і стабільність роботи датчика.

Наступним елементом є газоаналізатор MQ-135, який призначений для моніторингу якості повітря шляхом виявлення присутності різних газів, зокрема аміаку, бензолу, диму, вуглекислого газу та інших шкідливих речовин. Для MQ-135 характерна аналогова вихідна напруга, що потребує належної обробки і калібрування. В ході перевірки сенсор піддають тестам у різних газових середовищах з контрольованими концентраціями шкідливих речовин. Це дозволяє встановити точність, чутливість та лінійність реакції датчика. Особливу увагу приділяють стабільності показників при тривалому використанні, а також визначенню часу реакції на зміну концентрації газів. Крім того, під час тестування аналізують вплив температури і вологості на роботу сенсора, що важливо для експлуатації пристрою в різних кліматичних умовах.

Сенсор BMP280, який використовується для вимірювання атмосферного

тиску і температури, також проходить ретельні випробування. Його цифровий інтерфейс I2C дає змогу отримувати точні та стабільні дані, які потрібні для аналізу стану навколишнього середовища. Для перевірки BMP280 проводять вимірювання в різних температурних режимах, а також у змінних умовах тиску. Порівняння отриманих даних з показниками високоточних барометрів і термометрів дає змогу визначити похибки і внести необхідні корективи в калібрування. Тестування сенсора включає як статичні, так і динамічні вимірювання, що дозволяє оцінити його здатність реагувати на швидкі зміни навколишніх параметрів.

Після індивідуального тестування сенсорів переходять до інтеграційного етапу, під час якого перевіряють роботу всього апаратного комплексу в цілому. У цьому випадку особлива увага приділяється коректності з'єднань, стабільності живлення та узгодженості роботи всіх компонентів. ESP32-WROOM виступає центральним контролером, який координує збір даних від сенсорів і їх подальшу обробку. Перевіряють коректність роботи комунікаційних інтерфейсів, таких як I2C та аналогових входів, а також функціонування внутрішніх таймерів і переривань мікроконтролера. Важливо, щоб система могла працювати безперервно протягом тривалого часу, збираючи й передаючи дані без збоїв.

Одним із важливих аспектів є перевірка живлення апаратного комплексу. У системі використовується батарея 18650, потужність якої забезпечується через підвищуючий/знижуючий перетворювач S7V8F5 від Pololu. Тестування живлення включає перевірку стабільності напруги, здатності системи витримувати пікові навантаження під час передавання даних, а також споживання струму в різних режимах роботи : активний режим, режим сну ESP32. Це дозволяє оцінити тривалість автономної роботи та розробити стратегії енергозбереження, такі як використання *deep sleep* режимів мікроконтролера.

У процесі перевірки працездатності також здійснюють тестування стійкості системи до зовнішніх впливів. Важливо, щоб апаратне забезпечення витримувало перепади температури, підвищену вологість, пил та електромагнітні завади. Тестування в екстремальних умовах дозволяє виявити потенційні проблеми у

конструкції, такі як ослаблення контактів, некоректну роботу компонентів або деградацію сенсорів. Такі перевірки проводять у спеціальних камерах або в польових умовах, максимально наближених до реальних.

Особливу увагу приділяють тестуванню бездротових інтерфейсів ESP32 — Wi-Fi та Bluetooth. Випробування передбачають оцінку стабільності зв'язку, дальності дії, швидкості передачі даних, а також здатності системи відновлювати зв'язок після втрати сигналу. Це необхідно для забезпечення безперервного моніторингу та передачі інформації у реальному часі.

Завдяки системному підходу до перевірки працездатності можна впевнено стверджувати, що створений апаратний комплекс є готовим до експлуатації в реальних умовах. Така перевірка є не лише необхідним кроком перед запуском системи, а й основою для подальших експериментальних досліджень та вдосконалень.

Ретельна перевірка працездатності апаратної частини забезпечує надійність роботи IoT-системи моніторингу, дозволяє виявити недоліки на ранніх стадіях і запобігти виникненню критичних помилок під час експлуатації. Вона також слугує підставою для оцінки ефективності вибраних компонентів, параметрів живлення та загальної архітектури системи, що є важливим фактором для подальшого розвитку та масштабування проєкту.

3 ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ ТА ТЕСТУВАННЯ АПАРАТНОГО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ

3.1 З'єднання компонентів

Побудова IoT-системи моніторингу навколишнього середовища вимагає чіткого й обґрунтованого підходу до процесу з'єднання її апаратних компонентів. На цьому етапі важливо забезпечити електричну сумісність пристроїв, правильне фізичне підключення сенсорів до мікроконтролера, а також врахування параметрів живлення, рівнів логічних сигналів та надійність контактів. У розробленій системі використовуються наступні апаратні компоненти: мікроконтролер ESP32-WROOM, сенсори BH1750, MQ-135, BMP280, понижувально-підвищувальний перетворювач S7V8F5 від Pololu, та літієва акумуляторна батарея 18650 як основне джерело живлення (рис. 3.1). Розглянемо детально процес їх взаємного з'єднання.

Мікроконтролер ESP32-WROOM є центральним обчислювальним ядром, до якого під'єднуються всі сенсори системи. Він має достатню кількість аналогових і цифрових входів/виходів GPIO, а також підтримує кілька інтерфейсів зв'язку, серед яких особливо важливими для цього проєкту є інтерфейс I2C для BH1750 і BMP280 та аналоговий вхід для MQ-135. У системі реалізовано підключення I2C сенсорів по спільній шині, що значно спрощує електричну схему та зменшує кількість необхідних з'єднань.

Для передачі даних по шині I2C було обрано стандартні виводи ESP32: пін GPIO22 використовується як лінія тактуючого сигналу SCL, а GPIO21 — як лінія передачі даних SDA. До цієї пари підключено одночасно два сенсори — BH1750, який вимірює рівень освітленості, та BMP280, що визначає температуру та атмосферний тиск. Обидва ці сенсори мають підтримку I2C-протоколу, що дозволяє їх одночасну роботу без конфліктів на шині, за умови, що в них встановлені різні I2C-адреси. Завдяки цьому забезпечується ефективна передача цифрових даних з мінімальним споживанням енергії.

Підключення сенсора MQ-135, який використовується для визначення рівня забрудненості повітря, реалізовано через аналоговий вхід ESP32. Його аналоговий

вихід під'єднано до входу GPIO34 мікроконтролера. ESP32 має кілька входів ADC (аналогово-цифрових перетворювачів), що дозволяє зчитувати напругу з MQ-135 у вигляді аналогових значень, які потім інтерпретуються програмно.

Особливу увагу було приділено підключенню MQ-135, оскільки цей сенсор вимагає стабільного живлення 5 В, а ESP32 може забезпечити лише 3.3 В на своїх виходах. Щоб вирішити цю проблему, до системи було інтегровано підвищуючий/знижуючий перетворювач напруги S7V8F5 від компанії Pololu, який може подавати стабілізовану напругу 5 В на MQ-135. Цей перетворювач живиться від літєвої батареї 18650, яка подає напругу в діапазоні від 3.0 В до 4.2 В залежно від рівня заряду. Таким чином, навіть при зниженні напруги на батареї нижче 5 В, перетворювач забезпечує стабільне живлення сенсора.

Оскільки MQ-135 має аналоговий вихід з потенційною напругою до 5 В, а вхід ESP32 витримує максимум 3.3 В, було реалізовано подільник напруги на основі двох резисторів однакового номіналу — по 10 кОм кожен. Така схема дозволяє знизити напругу на аналоговому вході вдвічі, тобто максимум до 2.5 В, що є цілком безпечним рівнем для ADC ESP32. Подільник гарантує, що при зміні вихідного сигналу сенсора у всьому робочому діапазоні не виникне перевищення порогового рівня напруги, здатного пошкодити мікроконтролер.

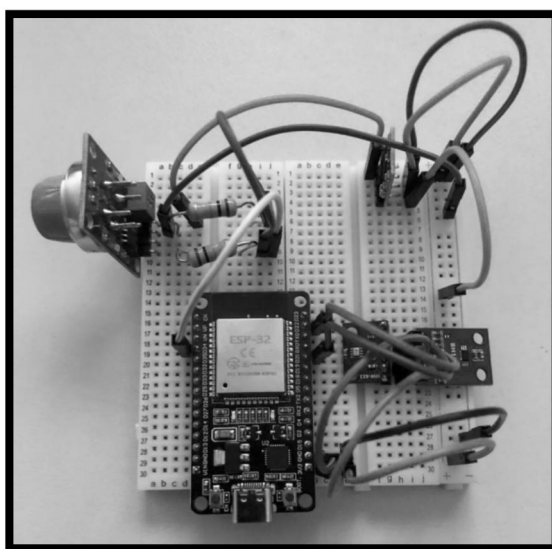


Рисунок 3.1 — Побудована IoT-система моніторингу навколишнього

середовища

Живлення всієї системи забезпечується літієвою батареєю типу 18650, яка відома своєю високою енергоємністю та широким діапазоном вихідної напруги. Вона дозволяє автономну роботу пристрою протягом тривалого періоду часу, що є ключовим фактором для IoT-систем, розміщених у віддалених або важкодоступних місцях. Через перетворювач напруги батарея також забезпечує живлення сенсора MQ-135. Інші сенсори BH1750 і BMP280 не мають потреби у підвищеній напрузі й працюють стабільно від лінії 3.3 В, яка подається безпосередньо з виходу ESP32.

Усі з'єднання було реалізовано із дотриманням стандартів пайки та електромонтажу: використано контактні штифти, роз'єми та захисні термоусадочні трубки. Також передбачено можливість роз'єднання сенсорів для заміни чи технічного обслуговування. З метою уникнення електромагнітних перешкод живлення сенсорів реалізоване окремими лініями з фільтрацією шумів.

У процесі створення IoT-системи надзвичайно важливою є грамотна організація електричних з'єднань не лише з точки зору функціональності, а й з урахуванням стабільності та надійності роботи в реальних умовах експлуатації. Фізичне з'єднання кожного з компонентів потребує уважного підходу — як з технічної, так і з ергономічної точки зору. Одним із головних викликів на цьому етапі є уникнення перешкод, збоїв у живленні або конфліктів сигналів, особливо якщо сенсори працюють одночасно й в різних режимах.

Зважаючи на обрані компоненти, до системи не додаються надмірні навантаження по струму, але слід враховувати, що MQ-135 у період прогріву може споживати значний струм до 200 мА, особливо якщо використовується його підігрівач. Тому із самого початку була поставлена задача — забезпечити ефективний розподіл навантаження між ESP32 та зовнішнім джерелом живлення. Рішенням стало впровадження підвищуючого/знижуючого перетворювача S7V8F5, який має вбудований стабілізатор та захист від короткого замикання. Він здатен не тільки підтримувати стабільні 5 В на виході, але й компенсувати коливання напруги, що часто виникають при роботі батареї 18650.

Це особливо актуально для тривалих періодів автономної роботи.

Для покращення надійності монтажу було вирішено винести MQ-135 на окрему макетну плату, з'єднану з основною через конектор типу Dupont. Це дає змогу не лише легко змінити або відкалібрувати сенсор, але й забезпечує його ефективну термічну ізоляцію, адже MQ-135 має внутрішній підігрів, який може впливати на температурну стабільність усього пристрою. Щоб мінімізувати вплив температурного дрейфу, MQ-135 було встановлено на деякій відстані від інших чутливих елементів — зокрема, BMP280, чутливого до зміни температури середовища.

Датчики BH1750 та BMP280, підключені до спільної I2C-шини, розміщено на одному модулі-перехіднику, що значно зменшує кількість дротів та фізичних з'єднань. Оскільки обидва сенсори працюють з однаковим рівнем напруги 3.3 В вони можуть живитися безпосередньо від відповідного пину ESP32. Додатково було застосовано фільтрувальні конденсатори керамічні на 0.1 мкФ, які підключаються між VCC та GND кожного сенсора, щоб згладжувати потенційні шумові імпульси, що виникають при імпульсному споживанні енергії з шин живлення.

З метою забезпечення сумісності інтерфейсів на рівні логіки було перевірено, що всі пристрої, зокрема I2C-сенсори, підтримують рівні сигналу 3.3 В. Важливо, що ESP32 не є толерантним до 5 В, тому жоден цифровий сигнал не повинен перевищувати цей рівень. У випадку MQ-135, зважаючи на аналоговий вихід, найпростіше і найнадійніше рішення — застосування подільника напруги. При цьому додатково було встановлено перевірку резисторного ланцюга мультиметром після монтажу, щоб гарантувати точність значення опору та відсутність холодних паяних з'єднань.

Окрему увагу слід звернути на заземлення — усі GND-провідники кожного компонента зведені в єдину загальну точку на платі ESP32. Уникнення плаваючих або окремих контурів заземлення є важливою умовою для стабільної роботи аналогових сенсорів. Нерідко помилки з'єднання заземлення призводять до нестабільних значень АЦП, особливо в умовах змінного навантаження або

високочастотного шуму.

3.2 Перевірка працездатності

Після завершення етапу з'єднання всіх апаратних компонентів системи моніторингу постала необхідність у здійсненні комплексної перевірки її працездатності. Така перевірка є критично важливою частиною розробки, оскільки дозволяє виявити можливі недоліки в монтажі, з'єднаннях, функціонуванні окремих сенсорів або несправності в живленні, а також переконатись у коректній взаємодії всіх елементів IoT-системи в цілому.

Процес перевірки працездатності розпочався з аналізу напруги живлення на кожному модулі. Як відомо, більшість сенсорів, що використовуються в системі, працюють при напрузі 3.3 В, а мікроконтролер ESP32 WROOM також має стабілізоване живлення через відповідний вивід 3.3 В. Підвищуючий/знижуючий перетворювач S7V8F5 від Pololu, який забезпечує стабільні 5 В при струмі до 1 А, було використано для подачі живлення на MQ-135, після чого напруга дільником знижувалася до рівня, безпечного для аналогового входу ESP32 (рис. 3.2).

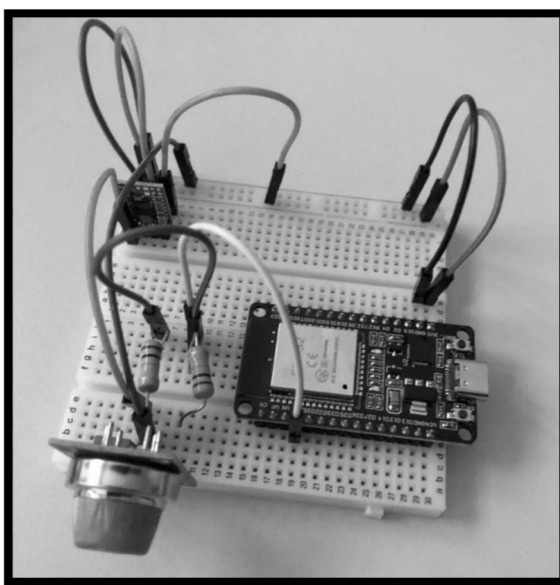


Рисунок 3.2. — Перевірка працездатності IoT-системи

На першому етапі перевірки було здійснено вимірювання напруг мультиметром на всіх основних вузлах: виходи живлення ESP32, виводи

сенсорів, вихід з перетворювача S7V8F5. Значення залишалися в межах номіналу — від 3.28 В до 3.31 В на лінії 3.3 В, та від 5.01 В до 5.03 В на лінії, яка йшла від Pololu до MQ-135. Це підтвердило правильність монтажу електроживлення та ефективність роботи перетворювача.

Наступним кроком стала перевірка функціонування інтерфейсу I2C, через який працюють цифрові сенсори BH1750 та BMP280. З обох сенсорів було передбачено з'єднання по одній шині: сигнальний вивід SCL підключено до GPIO22, а SDA — до GPIO21 мікроконтролера. Щоб переконатися у фізичній доступності пристроїв, було використано спеціальну функцію сканування I2C-адрес у середовищі Arduino IDE. Результатом сканування стало виявлення двох пристроїв за адресами 0x23 (BH1750) та 0x76 (BMP280), що підтвердило коректне підключення, наявність живлення та працездатність обох модулів.

Після цього розпочалося тестування сенсора MQ-135, аналоговий вихід якого було підключено через подільник напруги до входу GPIO34 ESP32. Подільник складався з двох резисторів по 10 кОм, які знижували напругу до рівня, безпечного для вхідного аналогового піну. У ході тестування було зчитано значення з цього входу через стандартну функцію `analogRead()`. Було зафіксовано стабільні коливання напруги при наближенні джерел газів, що свідчило про реакцію сенсора і відповідність заявленим характеристикам.

Далі, було проведено перевірку точності отриманих даних. Для BH1750 значення освітленості змінювалися пропорційно до інтенсивності освітлення у темряві показник коливався в межах від 0 lx до 3 lx, під час денного освітлення до 600 lx, а при направленому світлі — понад 1000 лк. BMP280 надавав стабільні значення температури та атмосферного тиску, які порівнювалися з еталонними значеннями поблизу розміщеного цифрового термометра і барометра. Різниця не перевищувала 2 % для температури і від 1.5 гПа до 2 гПа для тиску, що вважається прийнятним для побутових умов.

Ще одним важливим етапом було перевіряння поведінки системи при нестабільному живленні. Оскільки система працює автономно від батареї 18650, було симульовано часткове зниження заряду акумулятора. При падінні напруги

нижче 3.1 В система переходила в нестабільний режим, що проявлялося в нестабільному запуску ESP32. Таким чином, було прийнято рішення використовувати перетворювач із функцією зниження та підвищення напруги, що дозволяє підтримувати стабільні 5 В у широкому діапазоні напруги батареї від 2.7 В до 11.8 В, а вже потім через стабілізований вихід живити сенсори.

Окрім апаратної перевірки, проводилося тестування роботи прошивки, що базувалася на Arduino. Було перевірено правильність ініціалізації сенсорів, періодичність зчитування значень, а також вивід у серійний монітор для відлагодження. Усі дані зчитувалися стабільно кожні 5 секунд, що відповідало запрограмованим параметрам.

На завершення тестування проводилося спостереження за температурним режимом компонентів під час тривалого живлення. Було встановлено, що всі елементи працюють без перегріву навіть після кількох годин безперервної роботи, що підтвердило надійність живлення та правильність побудови схеми.

3.3 Умови проведення випробувань

Для забезпечення достовірності результатів, отриманих у процесі тестування розробленої IoT-системи моніторингу навколишнього середовища, важливим етапом є створення належних умов випробувань. Під цим поняттям мається на увазі визначення місця, часу, кліматичних і побутових параметрів, у яких працює система, а також фіксація зовнішніх факторів, здатних вплинути на її роботу.

Випробування проводилися як у приміщенні, так і в умовах відкритого середовища, що дало змогу охопити широкий спектр ситуацій, у яких може експлуатуватися система. Основною метою було оцінити стабільність, чутливість, точність вимірювань і надійність функціонування пристрою у різних сценаріях. Такий підхід дозволив протестувати систему в реальних умовах її майбутнього застосування.

Перший етап випробувань відбувався у закритому приміщенні з контрольованими умовами, де температура повітря коливалася в межах від +20 °C

до $+23^{\circ}\text{C}$, відносна вологість становила близько 50%, а рівень освітлення змінювався в межах від 100 lx до 400 lx залежно від часу доби. Такі умови дозволили оцінити базову працездатність усіх сенсорних компонентів і мікроконтролера ESP32-WROOM. За результатами випробувань у приміщенні було встановлено, що система успішно здійснює вимірювання та передавання даних, зберігаючи стабільну роботу протягом тривалого часу.

Другий етап передбачав проведення випробувань на відкритому повітрі в умовах денного природного освітлення. Випробування здійснювалися у весняний період, за температури повітря від $+13^{\circ}\text{C}$ до $+22^{\circ}\text{C}$ та відносної вологості в межах до 65%. Для точнішого аналізу система розміщувалася на відкритій ділянці, де були мінімальні перешкоди у вигляді тіней або забудови. Таким чином вдалося провести оцінку роботи сенсорів BH1750, BMP280 і MQ-135 в умовах максимально наближених до польових. Сенсор BH1750, зокрема, показував значні коливання значень у відповідь на зміни погодних умов: хмарність, пряма дія сонячного світла тощо. Це підтверджує його чутливість до зовнішніх факторів освітлення.

Особливу увагу було приділено MQ-135, який під час роботи в умовах вулиці фіксував коливання якості повітря у різні періоди дня. Наприклад, у ранкові години та ввечері, коли збільшується кількість транспортних засобів поблизу місця тестування, спостерігалось зростання рівнів виявлених забруднювальних речовин. Це дозволило зробити висновок про придатність MQ-135 до виявлення короткотривалих коливань забрудненості повітря.

Важливою складовою випробувань було також тестування системи за різних рівнів освітлення від повної темряви до прямого сонячного освітлення. Сенсор BH1750 добре реагував на ці умови, демонструючи широкий динамічний діапазон. Це підтвердило його здатність до роботи як у внутрішніх, так і у зовнішніх умовах експлуатації.

Стабільність живлення забезпечувалася акумуляторною батареєю формату 18650, яка подавала напругу на підвищуючий/знижуючий стабілізатор Pololu S7V8F5. Випробування тривали доти, доки напруга батареї не знизилася до

критичного значення, і дозволили оцінити автономність системи.

Також під час випробувань оцінювалося нагрівання компонентів, електромагнітна стабільність, відсутність перешкод у роботі сенсорів та коректність взаємодії між модулями I2C. В умовах підвищеної вологості система продовжувала працювати стабільно, що є позитивним сигналом щодо потенційної експлуатації в непередбачуваних зовнішніх умовах.

3.4 Реакція та поведінка окремих сенсорів

У цьому підпункті розглядається детальна реакція та поведінка кожного із сенсорних елементів, що входять до складу розробленої IoT-системи моніторингу. Йдеться про сенсори BH1750, MQ-135, BMP280, а також про особливості їх взаємодії з мікроконтролером ESP32-WROOM у реальному середовищі.

Датчик BH1750 показав високу чутливість до змін рівня освітлення. Його робота базується на фоторезистивному принципі, що забезпечує перетворення світлового потоку у цифрове значення. У ході експериментальних випробувань датчик стабільно фіксував зміну рівня освітлення як у приміщенні, так і на відкритому повітрі. Зокрема, під час поступового затемнення наприклад, коли на датчик падала тінь від руки або предмета значення інтенсивності світла змінювались пропорційно.

У денний час на відкритому повітрі при сонячній погоді датчик демонстрував значення понад 30 000 lx, що відповідає очікуваному рівню для умов прямого сонячного світла. У той же час у приміщенні зі штучним освітленням показники коливались в межах від 200 lx до 600 lx залежно від типу ламп та їх розміщення. BH1750 швидко реагує на зміни освітлення, демонструючи оновлення значень без затримок, що особливо важливо для систем, які потребують постійного моніторингу навколишніх умов.

Слід зазначити, що під час експлуатації датчика в умовах різкого контрасту наприклад, при переході з темного приміщення у світле сенсор потребує короткого часу для стабілізації показників менше 1 секунди, що є прийнятним для більшості практичних застосувань.

Сенсор MQ-135 виявився найбільш чутливим до змін у складі навколишнього повітря, проте його реакція є нелінійною і потребує попереднього калібрування. Датчик реагує на присутність в повітрі аміаку, бензолу, оксидів азоту, CO₂ та інших летких органічних речовин. У межах випробувань проводилось кілька експериментів для перевірки реакції сенсора на джерела забруднення повітря.

Наприклад, при піднесенні сенсора до відкритого флакону з розчинником або побутовою хімією, спостерігалось різке зростання значення вихідного сигналу. Після усунення джерела забруднення значення поступово знижувалися до початкового рівня, що вказує на здатність сенсора до самоочищення у чистому середовищі.

У звичайних умовах приміщення без додаткових джерел забруднення MQ-135 видавав стабільні значення на рівні від 1.2 В до 1.8 В. На відкритому повітрі, особливо поблизу проїжджих частин або в годину пік, спостерігалось підвищення концентрації шкідливих речовин, що було зафіксовано відповідним зростанням сигналу до 2.5 В. Така поведінка підтверджує здатність MQ-135 фіксувати реальні зміни якості повітря, проте без калібрування значення слід розглядати лише як відносні.

Також важливою характеристикою MQ-135 є його чутливість до вологості та температури. У разі різких коливань вологості значення можуть змінюватися навіть за незмінної концентрації забрудників. Цей факт слід враховувати при інтеграції датчика у складні системи екологічного моніторингу.

Сенсор BMP280 проявив себе як стабільне і точне джерело даних щодо температури та тиску. Згідно з технічною документацією, BMP280 має точність вимірювання температури ± 1 °C і тиску ± 1 гПа, що було підтверджено у межах тестування. У приміщенні температура, зафіксована сенсором, відрізнялася від показників ртутного термометра не більше ніж на 0.8 °C. Аналогічно, атмосферний тиск, зафіксований BMP280, відхилявся від показників найближчої метеостанції менше ніж на 1.2 гПа.

Датчик швидко реагує на зміну температури. При переміщенні з теплого

приміщення на вулицю зміна значення фіксувалася вже через 5–7 секунд. Утім, для повної стабілізації значення потрібен час до 30 секунд, що є прийнятним для систем з нечастим опитуванням.

Сенсор також продемонстрував стійкість до незначних вібрацій, механічних впливів і не виявив суттєвої залежності від положення у просторі, що дозволяє використовувати його у мобільних або переносних пристроях.

3.5 Калібрування датчиків

Калібрування датчиків є ключовим етапом забезпечення точності та надійності даних у IoT-системах моніторингу навколишнього середовища. Некоректно відкалібровані датчики можуть призводити до систематичних похибок, що значно знижує якість отриманої інформації та унеможлиблює її використання для прийняття виважених рішень. Тому процес калібрування передбачає встановлення відповідності між вихідним сигналом сенсора та реальною величиною, що вимірюється.

У розробленій системі використані датчики MQ-135, BH1750 та BMP280, кожен із яких має специфічні характеристики і потребує індивідуального підходу до калібрування.

Процедура калібрування базується на зборі експериментальних даних за відомих параметрів навколишнього середовища. Для кожного датчика визначається калібрувальна характеристика, яка описує залежність між значеннями, отриманими з пристрою, та фізичними величинами. Найчастіше ця залежність має нелінійний характер, тому для її апроксимації застосовують методи регресійного аналізу.

Для забезпечення коректності калібрування важливо проводити виміри в контрольованих умовах або порівнювати показники з результатами, отриманими за допомогою еталонного обладнання.

Калібрування датчика MQ-135. Датчик MQ-135 вимірює якість повітря, реагуючи на різноманітні гази, зокрема аміак, бензол, дим, CO₂. Оскільки його вихідний сигнал залежить від сумарної концентрації кількох газів, необхідно було

встановити емпіричну залежність між аналоговим напруговим сигналом на вході ESP32 (GPIO34) та реальними концентраціями шкідливих речовин.

Для калібрування було проведено виміри у контрольованих умовах. Спочатку зафіксовано фонове значення у «чистому» повітрі, яке становило приблизно 0.15 В. Далі поступово збільшували концентрацію газів за допомогою стандартних газових сумішей, фіксуючи відповідні показники напруги.

Результати тестування давача наведено у таблиці 3.1.

Таблиця 3.1 – Експериментальні результати концентрації газу

Концентрація газу ppm	Вихідна напруга, В
0	0.15
50	0.40
100	0.65
200	1.10
400	1.90

На основі отриманих даних було апроксимовано калібрувальну криву поліноміальною функцією другого ступеня:

$$ppm = a * V^2 + b * V + c,$$

де V — виміряна напруга,

a дорівнює -50,

b дорівнює 200.0,

c дорівнює -10.0 — коефіцієнти, підібрані методом найменших квадратів.

Лістинг 3.1 — Калібрування MQ-135

```
int analogValue = analogRead(GPIO34);
float voltage = analogValue * (3.3 / 4095.0);
float gasConcentration = -50.0 * voltage * voltage + 200.0 * voltage - 10.0;
if (gasConcentration < 0) gasConcentration = 0;
Serial.print("Концентрація газів ppm : ");
Serial.println(gasConcentration);
```

Калібрування датчика BH1750. Датчик BH1750 забезпечує цифрове

вимірювання рівня освітленості у люксах через інтерфейс I2C. Завдяки внутрішньому калібруванню, похибка пристрою є незначною, однак для підвищення точності було проведено порівняльні виміри з професійним люксометром у різних умовах освітлення — від сутінок до яскравого денного світла.

Результати тестування показали систематичний зсув у сторону завищення показників BH1750 приблизно на 3 %. Для корекції використовувався множник 0.97, що дозволяє компенсувати цей зсув.

Лістинг 3.2 — Калібрування BH1750

```
float luxRaw = bh1750.readLightLevel();
float luxCorrected = luxRaw * 0.97;
Serial.print("Освітленість : ");
Serial.println(luxCorrected);
```

Калібрування датчика BMP280. Датчик BMP280 використовується для вимірювання температури та атмосферного тиску. Для калібрування температурного каналу було порівняно показники BMP280 з результатами лабораторного термометра у діапазоні від 0 до 50 °C. Виміри тиску співставляли з даними метеостанції з високою точністю.

Аналіз експериментальних даних виявив систематичні відхилення, що не перевищували ± 0.3 °C для температури та ± 1.5 гПа для тиску. Для їх усунення було використано лінійні корекційні коефіцієнти.

Лістинг 3.3 — Код обробки даних з урахуванням калібрувальних поправок

```
float temperatureRaw = bmp280.readTemperature();
float pressureRaw = bmp280.readPressure() / 100.0F;
float temperatureCalibrated = temperatureRaw * 1.02 - 0.5;
float pressureCalibrated = pressureRaw * 0.98 + 1.2;
Serial.print("Температура : ");
Serial.println(temperatureCalibrated);
Serial.print("Тиск : ");
Serial.println(pressureCalibrated);
```

З огляду на те, що дана бакалаврська кваліфікаційна робота є складовою комплексного проєкту, попередньо була зібрана апаратна частина системи, яка детально описана у першій частині комплексної бакалаврської кваліфікаційної роботи на тему: «Апаратно-програмний комплекс моніторингу стану навколишнього середовища на базі IoT-засобів. Частина перша. Апаратне забезпечення». На основі створеної апаратної платформи у другій частині було розроблено програмне забезпечення, що забезпечує функціонування всієї системи моніторингу.

4 ПЕРСПЕКТИВИ ВДОСКОНАЛЕННЯ ТА ПОДАЛЬШОГО РОЗВИТКУ

4.1 Тестування на стійкість до впливів

Для забезпечення надійної роботи IoT-системи моніторингу навколишнього середовища необхідно проводити комплексне тестування апаратного забезпечення на стійкість до різних зовнішніх впливів. Умови експлуатації, особливо у відкритому середовищі, можуть включати широкий спектр факторів, таких як перепади температур, вологість, електромагнітні завади, механічні удари та коливання живлення. У цьому розділі наведено результати випробувань, що дозволили оцінити стабільність роботи компонентів системи та виявити потенційні слабкі місця.

4.1.1 Температурні випробування

Датчики BMP280 та MQ-135, а також мікроконтролер ESP32 WROOM були піддані температурним тестам у діапазоні від -10 °C до +50 °C, що відповідає типовим умовам роботи у помірному кліматі. Для цього апаратний комплекс розміщувався у кліматичній камері з можливістю точного контролю температури.

Протягом випробувань виконувалися регулярні зчитування показників з усіх датчиків. Виявлено, що BMP280 демонструє незначні зміни точності вимірювань тиску при низьких температурах — до 2 гПа відхилення від еталонних значень, що знаходиться у межах технічних характеристик. MQ-135 проявив підвищену чутливість до температурних змін (лістинг 4.2), що

виражалось у коливаннях аналогового сигналу близько 5 % при переході з кімнатної температури до 50 °С.

Лістинг 4.1 — Код для контролю температурних коливань та фільтрації шумів

```
float temperature = bmp280.readTemperature();
if (temperature < -10.0 || temperature > 50.0) {
    Serial.println("Попередження: температура поза робочим діапазоном!");
}
const int filterSize = 5;
float mqReadings[filterSize];
int index = 0;
float readFilteredMQ135() {
    mqReadings[index] = analogRead(GPIO34) * (3.3 / 4095.0);
    index = (index + 1) % filterSize;
    float sum = 0.0;
    for (int i = 0; i < filterSize; i++) {
        sum += mqReadings[i];
    }
    return sum / filterSize;}

```

Цей алгоритм дозволив зменшити вплив температурних шумів на показники датчика MQ-135.

4.1.2 Вологість та пил

Вологість є одним із факторів, які можуть негативно впливати на електроніку та сенсори. Для перевірки стійкості системи був проведений тест у камері з підвищеною вологістю до 85 %, а також імітовано пилові умови, характерні для вуличних середовищ.

Обладнання було покрито пиловою суспензією та працювало протягом 10 годин у таких умовах. Результати свідчать про стабільність живлення та коректну роботу датчиків ВН1750 і ВМР280 без істотних змін у показниках. MQ-135 дещо збільшив базовий рівень сигналу, що пояснюється накопиченням пилу на сенсорі, але після чистки датчика показники відновилися.

4.1.3 Електромагнітні перешкоди

Оскільки ESP32 WROOM працює з бездротовим зв'язком Wi-Fi і Bluetooth, було проведено тестування на стійкість до електромагнітних завад, викликаних сторонніми джерелами випромінювання, такими як мобільні телефони, радіопередавачі та інші бездротові пристрої.

Для цього датчики працювали в умовах інтенсивного радіочастотного шуму, при цьому моніторинг даних здійснювався з використанням логічного аналізатора та порівняння отриманих значень із еталонними.

Встановлено, що ESP32 проявляє високий рівень імунітету до впливу радіочастотних завад завдяки вбудованим схемам захисту. Датчики BH1750 та BMP280, які використовують інтерфейс I2C, також не показали помітних збоїв чи втрати даних. MQ-135, як аналоговий сенсор, був більш вразливим до шумів, але фільтрація сигналу в програмному забезпеченні знизила негативний ефект.

4.1.4 Коливання напруги живлення

Для оцінки впливу нестабільності живлення на роботу системи було здійснено тестування з різними рівнями напруги від 3.0 В до 3.6 В, імітуючи розряд акумуляторної батареї 18650.

Під час зниження напруги до 3.0 В система продовжувала коректно функціонувати, проте частота оновлення даних знижувалася через зростання часу на обробку в мікроконтролері. Визначено мінімальний поріг живлення, за яким система стабільно працює 3.0 В.

Підвищуючий/знижуючий перетворювач 5В 1А S7V8F5 від Pololu забезпечував стабільне живлення 3.3 В для датчиків, компенсуючи зміни вхідної напруги від батареї. Цей модуль підтвердив свою ефективність у підтриманні стабільності роботи IoT-комплексу.

4.2 Результати тестування

Проведене комплексне тестування апаратного забезпечення IoT-системи моніторингу навколишнього середовища дозволило детально оцінити роботу окремих компонентів, їх взаємодію та загальну стабільність функціонування

системи у різних умовах. На основі отриманих результатів було виявлено низку важливих аспектів, які впливають на ефективність та надійність системи, а також окремі недоліки, що потребують подальшого опрацювання.

4.2.1 Загальна оцінка працездатності системи

В цілому апаратний комплекс, що включає мікроконтролер ESP32 WROOM, сенсори BH1750, MQ-135, BMP280, а також підвищуючий/знижуючий перетворювач S7V8F5 та живлення від батареї 18650, показав високу стабільність роботи. Усі компоненти коректно з'єднувалися та взаємодіяли через шину I2C або аналогові входи, що підтвердило правильність конструктивного рішення.

Моніторинг параметрів навколишнього середовища відбувався з необхідною періодичністю, а отримані дані відповідали очікуваним діапазонам і були порівняні з еталонними вимірюваннями, що підтверджує точність сенсорів у типових умовах.

4.2.2 Виявлені недоліки

Під час тестування були виявлені деякі недоліки, які обмежують максимальну ефективність системи.

Чутливість датчика MQ-135 до температурних коливань і пилу. Як показали експерименти, MQ-135 має тенденцію до коливань вихідного сигналу під впливом зовнішніх факторів, зокрема при зміні температури та накопиченні пилу на поверхні сенсора. Це може призводити до неточностей у визначенні рівня забруднення повітря, особливо в умовах тривалої експлуатації без технічного обслуговування.

Обмежена автономність живлення. Використання батареї типу 18650 забезпечує досить тривалу роботу системи, але при активному використанні Wi-Fi та частому зчитуванні даних час роботи скорочується до кількох діб. Це потребує або застосування більш ємних джерел живлення, або оптимізації енергоспоживання за рахунок впровадження режимів сну deep sleep мікроконтролера.

Залежність від стабільності напруги живлення. Незважаючи на

використання підвищуючого/знижуючого перетворювача Pololu S7V8F5, короточасні коливання вхідної напруги впливають на стабільність сигналів сенсорів, що іноді може спричиняти втрату частини даних.

Обмеження шини I2C по довжині та кількості пристроїв. Оскільки два цифрові сенсори BH1750 і BMP280 підключені до однієї шини I2C GPIO21 — SDA, GPIO22 — SCL, подальше розширення системи додатковими пристроями може викликати проблеми з продуктивністю та конфліктами адрес, що потребує переходу на багатошинну архітектуру або використання мультиплексорів.

Відсутність апаратної захисту від вологи та пилу. Попри те, що система була протестована на стійкість до пилових та вологих умов, корпус і розводка не мають спеціальних захисних заходів герметизації, фільтрів, що обмежує її застосування в екстремальних зовнішніх середовищах.

4.2.3 Висновки щодо результатів тестування

Тестування підтвердило працездатність розробленої IoT-системи у стандартних умовах експлуатації з можливістю адаптації до різних параметрів навколишнього середовища. Виявлені недоліки є типовими для подібних апаратних рішень і можуть бути усунені шляхом подальшої оптимізації конструкції, застосування більш точних сенсорів, поліпшення системи живлення та впровадження засобів захисту.

4.3 Перспективи покращення апаратної частини

На основі проведеного експериментального дослідження та тестування апаратного комплексу IoT-системи моніторингу навколишнього середовища були визначені основні напрями, які дозволять підвищити надійність, точність вимірювань та енергоефективність системи. Удосконалення апаратної частини є ключовим етапом подальшої розробки, оскільки воно безпосередньо впливає на якість отриманих даних та практичну реалізацію системи у реальних умовах експлуатації.

4.3.1 Оптимізація системи живлення

Однією з основних проблем виявлено обмежену автономність роботи пристрою при активному режимі передачі даних через Wi-Fi. Для покращення енергоефективності рекомендується впровадження більш досконалих режимів енергозбереження, зокрема використання deep sleep режимів мікроконтролера ESP32, що значно знижують споживання електроенергії у періоди простою. Крім того, варто розглянути можливість використання більш ємних або гібридних джерел живлення, таких як літій-полімерні батареї або сонячні панелі, що забезпечать тривалу автономну роботу системи.

Удосконалення блоку живлення також може включати впровадження стабілізаторів з кращими характеристиками фільтрації шумів і коливань напруги, що підвищить стабільність роботи сенсорів та знизить похибки вимірювань.

4.3.2 Розширення та масштабування

Для підвищення інформативності системи слід розглянути інтеграцію додаткових сенсорів, які дозволять розширити спектр моніторингу. Наприклад, додавання датчиків вологості ґрунту, радіаційних сенсорів або сенсорів шуму дозволить комплексно оцінювати стан навколишнього середовища.

Оскільки два цифрові сенсори вже підключені до однієї шини I2C, масштабування потребує впровадження мультиплексорів I2C або використання альтернативних протоколів зв'язку SPI, UART для уникнення конфліктів адрес та зниження навантаження на шину.

4.3.3 Покращення апаратної надійності

Для застосування системи в складних умовах зовнішнього середовища слід розробити захищений корпус з рівнем захисту не нижче IP65, що забезпечить захист від пилу та вологи. Впровадження фільтрів для захисту сенсорів від забруднень та застосування матеріалів із підвищеною стійкістю до корозії дозволить збільшити термін служби апаратної частини.

Також варто передбачити систему моніторингу стану батареї та апаратних компонентів із можливістю віддаленого сповіщення про збої або необхідність

технічного обслуговування.

4.3.4 Вдосконалення програмного забезпечення апаратної частини

Не менш важливою є оптимізація прошивки мікроконтролера для забезпечення більш ефективного збору та передачі даних, зменшення енергоспоживання, а також впровадження алгоритмів самокалібрування сенсорів у процесі експлуатації.

Інтеграція алгоритмів фільтрації шумів і корекції похибок на апаратному рівні дозволить підвищити якість даних до рівня, необхідного для прийняття рішень.

4.3.5 Впровадження системи дистанційного оновлення

Для зручності обслуговування системи та можливості швидкого впровадження оновлень до програмного забезпечення рекомендується реалізувати механізм ОТА оновлень. Це дозволить оновлювати прошивку пристрою без фізичного доступу до нього, що особливо важливо при розгортанні у віддалених або важкодоступних місцях.

4.3.6 Використання машинного навчання та аналітики

У подальших етапах розвитку системи можливе впровадження алгоритмів машинного навчання для аналізу отриманих даних і прогнозування змін у навколишньому середовищі. Це дозволить не тільки збирати дані, а й перетворювати їх на цінну інформацію для прийняття рішень щодо охорони довкілля.

ВИСНОВКИ

Результатом бакалаврської роботи є розроблена IoT-система моніторингу навколишнього середовища, здатна здійснювати безперервний збір, обробку та передачу даних про рівень освітленості та якість повітря з використанням мікроконтролера ESP32 та сенсорів BH1750 і MQ-135. Створена система відповідає вимогам до сучасних автономних пристроїв: енергоефективність, точність, масштабованість і стабільність роботи в умовах обмеженого доступу.

Здійснено огляд апаратних платформ для реалізації IoT-проектів, що дозволило обґрунтовано обрати мікроконтролер ESP32-WROOM як оптимальний за сукупністю характеристик: двоядерна архітектура, наявність Wi-Fi і Bluetooth, підтримка потрібних протоколів та низьке енергоспоживання. Проаналізовано характеристики обраних сенсорів, їх принципи роботи та особливості інтеграції у єдину систему.

Розроблено структурну схему системи, виконано підбір компонентів та модулів, зокрема акумулятора типу 18650 для автономного живлення пристрою. Побудовано алгоритм функціонування системи.

У процесі експериментального дослідження перевірено працездатність усіх вузлів системи, проведено калібрування датчиків та досліджено їх реакцію на зовнішні впливи. Проведене тестування засвідчило ефективну роботу пристрою в умовах обмеженого енергопостачання та відсутності стабільного зв'язку.

Таким чином, виконана робота дозволила створити недорогу, надійну та гнучку IoT-систему, що може використовуватись для локального або віддаленого моніторингу екологічних параметрів у житлових, офісних або промислових середовищах, а також легко масштабуватись для більш складних застосувань.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Саленко, І. В. Основи Інтернету речей: навч. посіб. — Київ: КНЕУ, 2020. — 144 с.
2. Шевченко, А. В. IoT-системи моніторингу: архітектура та реалізація // Системи управління, навігації та зв'язку. — 2021. — №2(64). — С. 89–95.
3. Kurniawan, A. Internet of Things Projects with ESP32. — Packt Publishing, 2019. — 250 p.
4. David, P. Internet of Things with ESP32. — Leanpub, 2020.
5. Мельниченко, О. Ю. Порівняльний аналіз апаратних платформ для реалізації IoT-проектів // Вісник ХНУРЕ. — 2020. — №3. — С. 103–107.
6. Espressif Systems. ESP32 Technical Reference Manual [Електронний ресурс]. — Режим доступу: <https://www.espressif.com/en/support/documents/technical-documents>
7. Bosch. MQ-135 Air Quality Sensor Datasheet [Електронний ресурс]. — <https://www.winsen-sensor.com>
8. Rohm Semiconductor. BH1750 Light Sensor Datasheet [Електронний ресурс]. — <https://www.rohm.com>
9. Антонюк, С. В. Архітектури IoT-систем: типи, переваги та недоліки // Вісник НТУУ "КПІ". Серія: Автомат. управління. — 2022. — №4. — С. 27–32.
10. Hassan, Q. F. Internet of Things: Challenges, Advances, and Applications. — CRC Press, 2018.
11. Міністерство захисту довкілля та природних ресурсів України. Щорічна доповідь про стан навколишнього природного середовища в Україні за 2023 рік. [Електронний ресурс] — Київ, 2024. — Режим доступу: <https://mepr.gov.ua/> – Назва з екрана. – Дата звернення: 28.05.2025.
12. Iakovlev S., Prokopenko K., Kurylo I. IoT-Based Environmental Monitoring Systems: Review and Perspectives // 2022 IEEE 12th International Conference on Electronics and Information Technologies (ELIT). – Kyiv, 2022. – С. 68–73. – DOI: 10.1109/ELIT54879.2022.9837689.
13. Minerva R., Biru A., Rotondi D. Towards a Definition of the Internet of

Things (IoT) // IEEE Internet Initiative. – 2015. – 10 с. – [Електронний ресурс]. – Режим

доступу: https://iot.ieee.org/images/files/pdf/IEEE_IoT_Towards_Definition_Internet_of_Things_Revision1_27MAY15.pdf

14. Espressif Systems. ESP32 Technical Reference Manual. – Version 4.3. – 2021. – 628 с. – [Електронний ресурс]. – Режим доступу: https://www.espressif.com/sites/default/files/documentation/esp32_technical_reference_manual_en.pdf

15. Espressif Systems. ESP32 Technical Reference Manual. – Version 4.3. – 2021. – 628 с. – [Електронний ресурс]. – Режим доступу: https://www.espressif.com/sites/default/files/documentation/esp32_technical_reference_manual_en.pdf

16. Winsen Electronics Technology Co. Ltd. MQ-135 Gas Sensor Datasheet. – Zhengzhou, China, 2019. – [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://www.winsen-sensor.com/d/files/PDF/Gas%20Sensor/mq-135.pdf>

17. Пащенко А. М. Інтернет речей: архітектура, технології, застосування. – Київ: НАУ, 2020. – 148 с.

18. Гусєв, І. П. Основи проектування систем Інтернету речей / І. П. Гусєв. – Київ: Наукова думка, 2020. – 256 с.

19. Internet of Things (IoT): A Vision, Architectural Elements, and Future Directions / J. Gubbi, R. Buyya, S. Marusic, M. Palaniswami // Future Generation Computer Systems. 2013. Vol. 29, Issue 7. P. 1645–1660. DOI: 10.1016/j.future.2013.01.010.

20. Gubbi J., Buyya R., Marusic S., Palaniswami M. Internet of Things (IoT): A Vision, Architectural Elements, and Future Directions. Future Generation Computer Systems. 2013. Vol. 29, Issue 7, P. 1645–1660. DOI: 10.1016/j.future.2013.01.010.

21. Ковальчук О.В. Енергозабезпечення автономних IoT-пристроїв: огляд та перспективи. Вісник НТУУ "КПІ". Серія: Комп'ютерні науки. 2022. Вип. 60, С. 45–53.

22. Power Supply Design Considerations for IoT Devices / Texas Instruments

[Электронный ресурс]. — 2017. — Режим доступа: <https://www.ti.com/lit/an/slva714/slva714.pdf>

23. Hossain M. A., et al. Solar-Powered IoT Devices: Design and Challenges / M. A. Hossain, et al. // Sensors. — 2020. — Vol. 20, No. 12. — Article 3457. — Режим доступа: <https://www.mdpi.com/1424-8220/20/12/3457>

24. Suryadevara, N.K., Mukhopadhyay, S.C. (2015). Wireless sensor network based home monitoring system for wellness determination of elderly. IEEE Sensors Journal, 13(10), 3936-3944. DOI: 10.1109/JSEN.2013.2276406

25. Espressif Systems. (2024). ESP32 Series Datasheet. URL: <https://www.espressif.com/en/support/documents/technical-documents>

26. Panasonic Corporation. Lithium Ion Batteries Technical Handbook. – Panasonic Energy Co., Ltd., 2021. – [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://industrial.panasonic.com/ww/products/batteries/lithium-ion>

ДОДАТОК А

Технічне завдання

Міністерство освіти і науки України

Вінницький національний технічний університет

Факультет інформаційних технологій та комп'ютерної інженерії

Кафедра обчислювальної техніки

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри ОТ

проф., д.т.н.. Азаров О.Д.

«21» березня_2025 р.

ТЕХНІЧНЕ ЗАВДАННЯ

на виконання бакалаврської кваліфікаційної роботи

«Апаратно-програмний комплекс моніторингу стану оточуючого середовища на базі IoT засобів. Частина 1. Апаратне забезпечення»

08-54. КБКР.038.00.000 ТЗ

Науковий керівник: к.н.т., доцент кафедри ОТ

_____ Богомолів С.В.

Студент групи 1КІ-216

_____ Павленко П.І.

1 Підстава для використання бакалаврської кваліфікаційної роботи (КБКР)

1.1 У сучасних умовах стрімкого зростання екологічних загроз особливої актуальності набуває використання IoT-технологій для безперервного моніторингу параметрів навколишнього середовища. Розробка апаратної частини таких систем дозволяє забезпечити надійний збір, обробку та передавання екологічних даних у реальному часі, що є критично важливим для прийняття своєчасних рішень щодо збереження довкілля.

1.2 Наказ про затвердження теми кваліфікаційної роботи.

2 Мета КБКР і призначення розробки

2.1 Мета роботи — розробка енергозберігаючої та ефективної IoT-системи для моніторингу параметрів навколишнього середовища з використанням ESP32 та відповідної сенсорної бази.

2.2 Призначення розробки — створення енергозберігаючої та ефективної IoT-системи для моніторингу параметрів навколишнього середовища.

3 Вихідні дані для виконання КБКР

3.1 Проведення аналізу сучасних систем для моніторингу параметрів навколишнього середовища, методів збору показників;

3.2 Розробка структури, логіки взаємодії компонентів;

3.3 Реалізація та компонування елементів системи;

3.4 Тестування стабільності та швидкодії вимірювання параметрів;

4 Вимоги до виконання КБКР

Головна вимога — створити енергоефективну, стабільну та масштабовану апаратну частину IoT-системи, яка забезпечує збір, обробку, та передавання екологічних параметрів.

5 Етапи КБКР та очікувані результати

Етапи роботи та очікувані результати приведено в Таблиці А.1.

Таблиця А.1 — Етапи роботи та очікувані результати

№ етапу	Назва етапу	Термін виконання	Очікувані результати
1	Аналіз сучасних IoT-систем моніторингу навколишнього середовища	21.03.25 – 30.03.25	Аналітичний огляд
2	Обґрунтування вибору апаратних компонентів та розробка структурної схеми	31.03.25 – 06.04.25	Розділ 2
3	Опис сенсорів ВН1750, MQ-135, ВМР280, вибір стабілізатора та джерела живлення	07.04.25 – 13.04.25	Розділ 2
4	З'єднання компонентів та перевірка працездатності	14.04.25 – 20.04.25	Розділ 3
5	Тестування, калібрування та аналіз поведінки сенсорів	21.04.25 – 27.04.25	Розділ 4
6	Аналіз результатів, недоліків та перспектив покращення	28.04.25 – 01.05.25	Розділ 4
7	Оформлення пояснювальної записки, графічного матеріалу та презентації	02.05.25 – 11.05.25	Пояснювальна записка, графічні матеріали, презентація

6 Матеріали, що подаються до захисту КБКР

До захисту подаються: пояснювальна записка КБКР, графічні та ілюстративні матеріали, протокол попереднього захисту на кафедрі, відгук наукового керівника, відгук опонента, протоколи складання державних екзаменів, анотації до КБКР українською та іноземною мовами, довідка про відповідність оформлення вимогам.

7 Порядок контролю виконання та захисту КБКР

Контроль виконання етапів здійснюється науковим керівником згідно з встановленими термінами. Захист БКР проходить на засіданні екзаменаційної комісії, затвердженої наказом ректора.

8 Вимоги до оформлення та порядок виконання БКР

8.1 При оформленні БКР використовуються:

- ДСТУ 3008 : 2015 «Звіти в сфері науки і техніки. Структура та правила оформлювання»;
- ДСТУ 8302 : 2015 «Бібліографічні посилання. Загальні положення та правила складання»;
- методичні вказівки до виконання бакалаврських кваліфікаційних робіт для студентів спеціальності 123 «Комп'ютерна інженерія» (освітня програма «Комп'ютерна інженерія») — кафедра обчислювальної техніки, ВНТУ 2023.

8.2 Порядок виконання БКР викладено в «Положення про кваліфікаційні роботи на першому (бакалаврському) рівні вищої освіти СУЯ ВНТУ-03.02.02-П.001.01:21»

ДОДАТОК Б

ПРОТОКОЛ ПЕРЕВІРКИ КВАЛІФІКАЦІЙНОЇ РОБОТИ НА НАЯВНІСТЬ ТЕКСТОВИХ ЗАПОЗИЧЕНЬ

Назва роботи:

Апаратно-програмний комплекс моніторингу стану оточуючого середовища на базі IoT засобів. Частина 1. Апаратне забезпечення

Тип роботи: Бакалаврська кваліфікаційна робота
(БДР, МКР)

Підрозділ кафедра обчислювальної техніки
(кафедра, факультет)

Показники звіту подібності StrikePlagiarism

Оригінальність 99.5% Схожість 0.5%

Аналіз звіту подібності (відмітити потрібне):

- ☒ Запозичення, виявлені у роботі, оформлені коректно і не містять ознак плагіату.
- ☐ Виявлені у роботі запозичення не мають ознак плагіату, але їх надмірна кількість викликає сумніви щодо цінності роботи і відсутності самостійності її виконання автором. Роботу направити на розгляд експертної комісії кафедри.
- ☐ Виявлені у роботі запозичення є недобросовісними і мають ознаки плагіату та/або в ній містяться навмисні спотворення тексту, що вказують на спроби приховування недобросовісних запозичень.

Особа, відповідальна за перевірку _ Захарченко С. М.
(підпис) (прізвище, ініціали)

Ознайомлені з повним звітом подібності, який був згенерований системою StrikePlagiarism щодо роботи.

Автор роботи _____ Павленко П.І.
(підпис) (прізвище, ініціали)

Керівник роботи _____ Богомолів С.В.
(підпис) (прізвище, ініціали)

ДОДАТОК В

ГРАФІЧНА ЧАСТИНА

**АПАРАТНО-ПРОГРАМНИЙ КОМПЛЕКС МОНІТОРИНГУ СТАНУ
ОТОЧУЮЧОГО СЕРЕДОВИЩА НА БАЗІ ІОТ-ЗАСОБІВ. ЧАСТИНА 1.
АПАРАТНЕ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ**

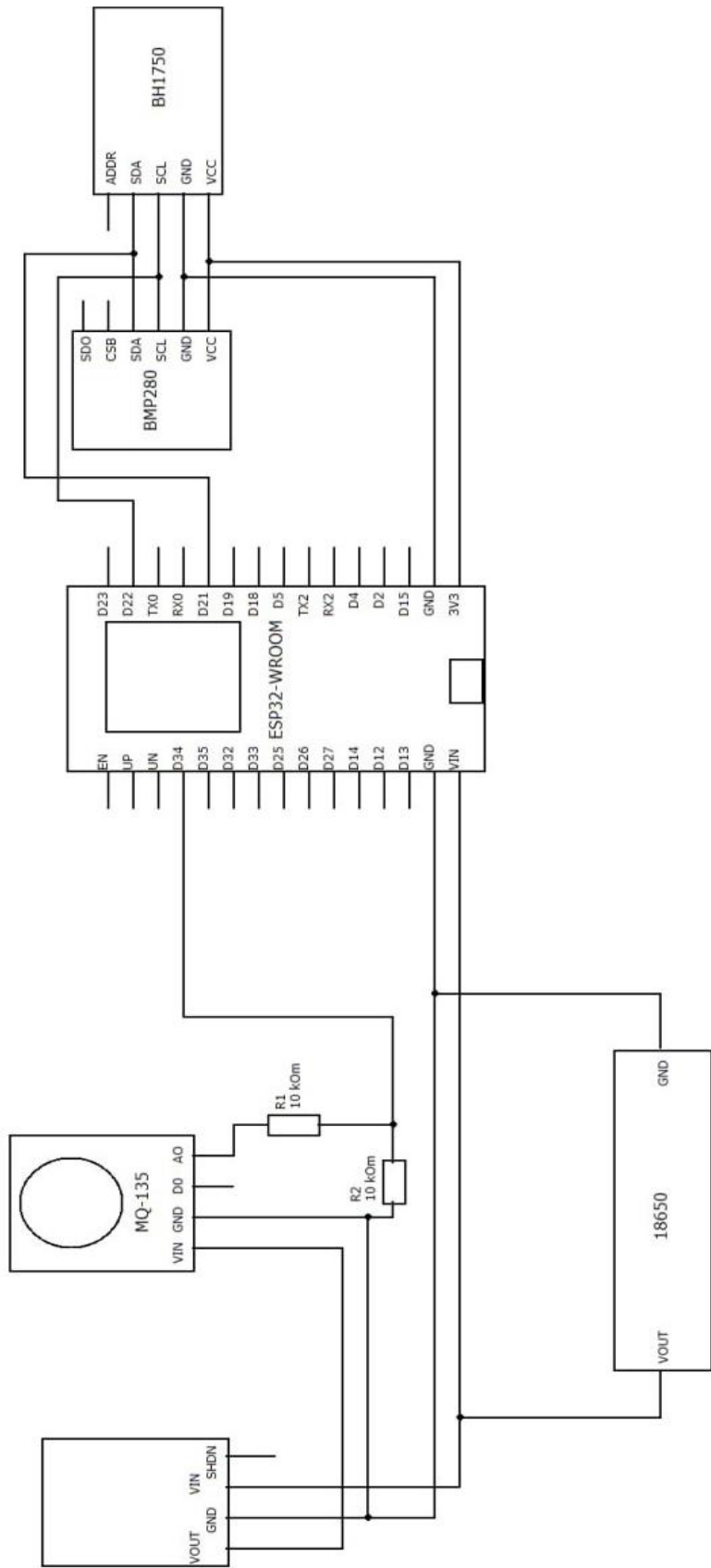


Рисунок Д.1 – Схема електрична принципова

ДОДАТОК Г

Лістинг програмного коду калібрування датчика MQ-135

```
int analogValue = analogRead(GPIO34);  
float voltage = analogValue * (3.3 / 4095.0);  
float gasConcentration = -50.0 * voltage * voltage + 200.0 * voltage - 10.0;  
if (gasConcentration < 0) gasConcentration = 0;  
Serial.print("Концентрація газів ppm : ");  
Serial.println(gasConcentration);
```

ДОДАТОК Д

Лістинг програмного коду калібрування давача BMP280

```
float luxRaw = bh1750.readLightLevel();  
float luxCorrected = luxRaw * 0.97;  
Serial.print("Освітленість : ");  
Serial.println(luxCorrected);  
float temperatureRaw = bmp280.readTemperature();  
float pressureRaw = bmp280.readPressure() / 100.0F;  
float temperatureCalibrated = temperatureRaw * 1.02 - 0.5;  
float pressureCalibrated = pressureRaw * 0.98 + 1.2;  
Serial.print("Температура : ");  
Serial.println(temperatureCalibrated);  
Serial.print("Тиск : ");  
Serial.println(pressureCalibrated);
```