НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ
імені ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»

Факультет електроніки

Кафедра електронних пристроїв та систем

До захисту допущено:
Завідувач кафедри
_____ Євген ВЕРБИЦЬКИЙ
«___»___червня _____2025 р.

Дипломний проєкт

на здобуття ступеня бакалавра
за освітньо-професійною програмою «Електронні прилади та пристрої»
спеціальності 171 «Електроніка»
на тему: «Система моніторингу параметрів оточуючого середовища»

Виконав (-ла):
студент (-ка) IV курсу, групи ДЕ-11
Тамаркін Євгеній Сергійович _____

Керівник:
Старший викладач
Бевза Олег Миколайович _____

Рецензент:
доцент каф. АМЕС, к.т.н., доцент
Желяскова Тетяна Миколаївна _____

Консультант
з нормоконтролю
Доцент кафедри ЕПС, к.т.н., доцент
Батрак Лариса Миколаївна _____

Засвідчую, що у цьому дипломному проєкт немає запозичень з праць інших авторів без відповідних посилань.
Студент (-ка) _____

Київ – 2025 року

ВІДОМІСТЬ ДИПЛОМНОГО ПРОЄКТУ

№ з/п	Формат	Позначення	Найменування	Кількість листів	Примітк
1	А4		Завдання на дипломний проєкт	1	
2	А4	ДП ДЕ11. 11.000 ПЗ	Пояснювальна записка	69	
3	А3	ДП ДЕ11. 01.000 Е1	Схема електрична структурна	1	
4	А3	ДП ДЕ11. 02.000 Е3	Схема електрична принципова	1	
5	А3	ДП ДЕ11. 04.000	Плата	1	
6	А4	ДП ДЕ11. 05.000 ПЕ3	Перелік елементів	1	

				ДП ДЕ11 00.000.ВП	
	ПІБ	Підп.	Дата		
Розробн.	Тамаркін			**Система моніторингу параметрів оточуючого середовища** Відомість дипломного проєкту	Лист 1 / Листів 1
Керівн.	Бевза				
Консульт.					«КПІ ім. Ігоря Сікорського», ФЕЛ, ЕПС, гр. ДЕ-11
Н/контр.	Батрак				
Затвердив	Бевза				

Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Факультет електроніки

Кафедра електронних пристроїв та систем

Рівень вищої освіти – перший (бакалаврський)

Спеціальність – 171 «Електроніка»

Освітньо-професійна програма «Електронні прилади та пристрої»

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри

_____ Євген ВЕРБИЦЬКИЙ

«21» травня 2025 р.

ЗАВДАННЯ

на дипломний проєкт студенту

Тамаркіну Євгенію Сергійовичу

1. Тема проєкту _«Система моніторингу параметрів оточуючого середовища»

керівник проєкту Бевза Олег Миколайович,
Прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання,

затверджені наказом по університету від «03» червня 2025 р. №1885-с

2. Термін подання студентом проєкту 10 червня 2025

3. Вихідні дані до проєкту Температура: -55…+125 °C; Вологість: 20–80%; Освітленість: 0–1000 люкс _____
_____
_____

4. Зміст пояснювальної записки 1. Огляд систем моніторингу параметрів зовнішнього середовища; 2. Розробка та розрахунок системи; 3. Розробка друкованого вузла; 4. Програмне забезпечення; Висновки та рекомендації
_____

5. Перелік графічного матеріалу (із зазначенням обов'язкових креслеників, плакатів, презентацій тощо) Структурна схема, Принципова схема, Креслення друкованої плати

6. Консультанти розділів проєкту*

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв

7. Дата видачі завдання 21 травня 2025 р.

Календарний план

№ з/п	Назва етапів виконання дипломного проєкту	Термін виконання етапів проєкту	Примітка
1	Огляд існуючих рішень	13.03.25	Виконано
2	Класифікація систем моніторингу	20.03.25	Виконано
3	Електронні компоненти та прилади	27.03.25	Виконано
4	Протоколи передачі даних	03.04.25	Виконано
5	Розробка апаратного забезпечення	17.04.25	Виконано
6	Розробка алгоритмів	01.05.25	Виконано
7	Розробка програмного забезпечення	04.06.25	Виконано

Студент Євгеній ТАМАРКІН

Керівник Олег БЕВЗА

А Н О Т А Ц І Я

Дипломний проєкт присвячений розробці системи моніторингу параметрів оточуючого середовища. Актуальність теми зумовлена зростаючою потребою в автономних та енергоефективних рішеннях для контролю мікроклімату. Сучасні виклики, такі як потреба в оптимізації ресурсів у сільському господарстві підкреслюють необхідність розробки компактних систем для збору даних про температуру, вологість і освітленість.

Метою даного проєкту є створення системи моніторингу параметрів навколишнього середовища на базі мікроконтролера ESP32-WROVER-I з передачею даних через Wi-Fi для забезпечення автономного контролю мікроклімату. Для її досягнення були поставлені такі завдання:

– провести аналіз існуючих промислових систем;

– розробити апаратне забезпечення системи;

У ході роботи проведено аналіз існуючих рішень у галузі роботи проведено аналіз існуючих рішень у галузі моніторингу мікроклімату, які мають високу точність, але є дорогими та обмеженими у функціональності. Розроблено портативну систему на базі ESP32-WROVER-I. Основну увагу приділено енергоефективним схемотехнічним рішенням, модульній програмній архітектурі, та передачі даних через Wi-Fi.

У проєкті реалізовано пристрій портативної системи моніторингу параметрів навколишнього середовища з використанням Altium Designer. Проведено експериментальні дослідження, які підтверджують ефективність запропонованого рішення.

Результати проєкту можуть бути використані у сільському господарстві для оптимізації мікроклімату.

Ключові слова: електроніка, схемотехніка, програмовані схеми, вимірювання температури, моніторинг навколишнього середовища.

ABSTRACT

The diploma project is dedicated to the development of an environmental monitoring system. The relevance of the topic is due to the growing need for autonomous and energy-efficient solutions for microclimate control. Modern challenges, such as the need to optimise resources in agriculture, highlight the need to develop compact systems for collecting temperature, humidity and light data.

The goal of this project is to create an environmental monitoring system based on the ESP32-WROVER-I microcontroller with Wi-Fi data transmission to provide autonomous microclimate control. To achieve this, the following tasks were set:

– to analyse existing industrial systems;

– to develop the system hardware;

The study analysed existing solutions in the field of microclimate monitoring, which are highly accurate but expensive and limited in functionality. A portable system based on ESP32-WROVER-I has been developed. The focus is on low-power circuitry, modular software architecture, and Wi-Fi data transmission.

The project implemented a device for a portable environmental monitoring system using Altium Designer. Experimental studies have been conducted to confirm the effectiveness of the proposed solution.

The project results can be used in agriculture to optimise the microclimate.

Keywords: electronics, circuits, programable circuits, temperature measurement, environmental monitoring.

ЗМІСТ

ВСТУП 9
1 ОГЛЯД СИСТЕМ МОНІТОРИНГУ ПАРАМЕТРІВ ЗОВНІШНЬОГО СЕРЕДОВИЩА 11
1.1 Глобальні дослідження у сфері моніторингу середовища 11
1.2 Vaisala HMT120 12
1.3 Testo 160 TH 14
1.4 Rotronic HygroPalm HP23 16
1.5 Обґрунтування вибору мікроконтролера 18
1.6 Обґрунтування вибору прошивки для мікроконтролеру ESP32 22
1.6.1. Порівняльний аналіз платформ розробки 22
1.6.2. Порівняльна оцінка за ключовими критеріями 24
1.6.3. Обґрунтування вибору ESPHome 25
Висновки до розділу 26
2 РОЗРОБКА ТА РОЗРАХУНОК СИСТЕМИ МОНІТОРИНГУ ПАРАМЕТРІВ ЗОВНІШНЬОГО СЕРЕДОВИЩА 29
2.1. Розробка структурної схеми 29
2.1.1. Система електроживлення та енергозбереження 29
2.1.2. Система збору даних та сенсорна підсистема 31
2.1.3. Система обробки та передачі даних 31
2.1.4. Інтеграція компонентів та системна взаємодія 32
2.2. Розробка принципової схеми 34
2.2.1 Мікроконтролер ESP32-WROWER-I та його живлення 35
2.2.2 Давач температури DS18B20 та його інтеграція 38
2.2.3 Ємнісний давач вологості 41
2.2.4 Давач освітленості на базі фоторезистора PDV-P8003 45
2.2.5 Система живлення 48

Висновки до розділу..... 52
3 РОЗРОБКА ДРУКОВАНОГО ВУЗЛА..... 53
3.1. Вибір та обґрунтування типу друкованої плати 53
3.2 Вибір та обґрунтування матеріалу друкованої плати 54
3.3 Вибір та обґрунтування форми та розміру друкованої плати 54
3.4 Вибір та обґрунтування класу точності 54
3.5 Конструкторсько-технологічний розрахунок друкованої плати 55
3.6 Електричний розрахунок друкованої плати..... 57
3.7 Розрахунок надійності друкованого вузла..... 57
3.8 Розрахунок вібростійкості друкованого вузла 58
3.9 Проєктування друкованої плати..... 59
Висновки до розділу..... 59
4 ПРОГРАМНЕ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ..... 61
4.1. Вимоги до програмного забезпечення 61
4.2 Алгоритм роботи програмного забезпечення 61
Висновки до розділу..... 64
ВИСНОВКИ 65
ПЕРЕЛІК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ..... 68
Додаток А. Структурна схема
Додаток Б. Принципова схема
Додаток В. Креслення друкованої плати
Додаток Г Лістинг Коду
Додаток В Summary

ВСТУП

У XXI столітті моніторинг мікроклімату набуває принципово нового значення через низку глобальних викликів, серед яких зміни клімату, урбанізація, деградація екосистем, енергетична криза, а також необхідність забезпечення сталого розвитку. Параметри мікроклімату — температура, вологість, освітленість, атмосферний тиск — є критично важливими для екологічного балансу, комфорту проживання, здоров'я населення, безпеки технологічних процесів, а також ефективності аграрного та промислового виробництва. Саме тому в останні десятиліття спостерігається стрімке зростання кількості наукових праць і практичних розробок, присвячених побудові сенсорних систем для контролю середовищних параметрів.

Одним із основних трендів сучасного світу є інтеграція технологій Інтернету речей (Internet of Things, IoT) у повсякденне життя та виробництво. Розумні екосистеми, такі як smart home, smart city, smart agriculture, вимагають наявності мережі давачів, здатних постійно або періодично збирати інформацію про стан довкілля. За даними аналітичного звіту [9], саме екологічний моніторинг посідає провідне місце серед сфер застосування IoT-рішень у країнах з розвиненою інфраструктурою.

Особливу актуальність питання моніторингу мікроклімату набуває в умовах України — як країни з вираженими сезонними перепадами температури, підвищеною вологості в окремих регіонах, загрозою пилових бур, зниженням якості повітря через воєнні дії. У такому середовищі портативні пристрої екологічного моніторингу можуть слугувати джерелом незалежної інформації про стан середовища на локальному рівні: в житлових приміщеннях, навчальних закладах, теплицях, майстернях, а також на відкритій території — парках, дорогах, будівельних майданчиках.

Крім того, згідно з рекомендаціями Європейської комісії [2], одним із пріоритетних напрямів наукових досліджень є створення систем «розумного

контролю мікросередовища», здатних самостійно реагувати на зміни, адаптувати режим роботи та передавати інформацію до хмарних сховищ або локальних сервісів.

У кожній із цих галузей вимоги до сенсорної системи відрізняються, проте спільними залишаються критерії: точність, стабільність, енергоефективність, низька вартість, простота обслуговування. Саме тому одним із перспективних напрямів вважається використання відкритих платформ на зразок ESP32, сумісних із широким набором давачів, таких як BME280, DHT22, BH1750.

Таким чином, актуальність тематики розробки компактного, автономного та недорогого пристрою моніторингу мікроклімату не викликає сумнівів. Такий пристрій не лише відповідає вимогам часу, а й здатен стати основою для масштабованих екосистем, як у наукових цілях, так і в повсякденному житті. Його створення на основі сучасних відкритих апаратно-програмних рішень відповідає стратегічному напряму глобального технологічного розвитку та дозволяє реалізувати проєкт з високою прикладною цінністю для користувача. Глобальні дослідження у сфері моніторингу середовища

Відомі дослідницькі центри, зокрема Fraunhofer Institute (Німеччина), MIT Senseable City Lab (США), а також Європейська мережа COST Action CA16226 (Indoor Air Quality) активно досліджують методи точного моніторингу кліматичних параметрів в архітектурі, сільському господарстві, медичних закладах. Публікації [3, 7, 8] підтверджують, що точні та автономні сенсорні системи забезпечують значне покращення в управлінні ресурсами та комфортом середовища.

1. Огляд систем моніторингу параметрів зовнішнього середовища

1.1. Глобальні дослідження у сфері моніторингу середовища

Моніторинг мікроклімату в аграрному секторі спрямований на контроль температури (0–40°C, точність ±0.5–1°C), вологості (20–90% RH, ±2–5%) та освітленості (100–50000 lx, ±10–20%) для створення оптимальних умов росту рослин у теплицях, гідропонних системах чи вертикальних фермах. Промислові рішення, такі як Vaisala HMT120, Testo 160 TH і Rotronic HygroPalm HP23, забезпечують високу точність і надійність у широкому діапазоні умов (–40°C до +80°C), оснащені цифровими інтерфейсами (Modbus, Ethernet) і захистом IP65–IP68, що ідеально для великих аграрних комплексів зі стандартами GMP чи ISO [7]. Однак їхня висока вартість (400–1200 євро) і залежність від спеціалізованого ПЗ обмежують доступність для малих ферм.

Для бюджетних проєктів популярні IoT-сенсори (BME280, DHT22, BH1750, TSL2561), які забезпечують достатню точність (±1°C, ±3% RH, ±10–20% lx) за вартістю 10–50 євро, легко інтегруються з Arduino чи Raspberry Pi і підходять для автоматизації поливу чи освітлення, хоча потребують калібрування. Сенсори на відкритих компонентах (наприклад, BME280+TSL2561) пропонують баланс між економічністю і точністю, що підтверджується IEEE Sensors Journal, і є перспективними для малих ферм. Вибір системи залежить від масштабу, бюджету та вимог: промислові рішення оптимальні для великих господарств, а IoT-сенсори — для малих проєктів.

З огляду на різноманітність доступних рішень для моніторингу мікроклімату, важливо детально розглянути їхні характеристики, щоб визначити оптимальний вибір для різних сценаріїв використання. Промислові пристрої, такі як Vaisala HMT120, Testo 160 TH і Rotronic HygroPalm HP23, пропонують високу точність і надійність, але їхня ціна та складність інтеграції можуть бути перешкодою для малих аграрних ініціатив. Натомість

IoT-системи та розробки на базі відкритих компонентів, зокрема з використанням мікроконтролера ESP32-WROVER-I, забезпечують економічність і гнучкість, що робить їх привабливими для невеликих проєктів.

У даному розділі буде проведено порівняльний аналіз промислових пристроїв Vaisala HMT120, Testo 160 TH і Rotronic HygroPalm HP23, а також обґрунтовано вибір мікроконтролера ESP32-WROVER-I для створення бюджетного рішення. Це дозволить оцінити сильні та слабкі сторони кожного підходу і визначити, яке рішення найкраще відповідає потребам конкретного користувача, враховуючи такі фактори, як точність, автономність, захист від зовнішніх умов і доступність.

1.2. Vaisala HMT120

Vaisala HMT120 — це професійний пристрій для моніторингу вологості та температури, призначений для використання в промислових, наукових і комерційних умовах (рис. 1.1).

Рис. 1.1. Зовнішній вигляд Vaisala HMT120

Згідно технічної документації [1] для даного пристрою перевагами є: висока точність вимірювань (температура ±0.2°C у діапазоні 0…+40°C,

вологість ±1.5% RH при 0…90% RH (при 15…25°C)), надійність і довговічність (використовує давач вологості, який має захист від хімічних впливів і конденсації, також корпус виконано за стандартом IP65, що забезпечує стійкість до пилу та бризок), даний пристрій має широкий діапазон робочих умов (робочий діапазон температури 0…+40°C, робочий діапазон вологості 0…90% RH (при 15…25°C)), гнучкість конфігурації пристрою (використання виносних давачів(довжина до 10 м), що дозволяє моніторити недоступні місця, також пристрій має аналогові входи (4…20 мА або 0…10 В) і опціональний RS-485 (Modbus RTU) для інтеграції в системи автоматизації), калібрування даного пристрою є досить легким, так як він підтримує налаштування в польових умовах за допомогою портативного калібратора, також давач пристрою є з'ємним, що полегшує його заміну, енергоспоживання є достатньо низьким ~10–20 мА при 24 В, що є досить енергоефективним для стаціонарних систем. Недоліками же даного пристрою є: висока вартість ($300–1000 (~12,600–42,000 UAH)), така ціна робить даний пристрій недоступним для малих організацій, де бюджет обмежений, також у не підтримуються жодні бездротові стандарті, такі як, Wi-Fi або Bluetooth, у стандартній комплектації, це обмежує використання пристрою у системах віддаленого моніторингу, пристрій має стаціонарну конструкцію, шо унеможливлює портативне використання, на відміну від IoT-рішень, має значну вагу (~200–500 г, залежно від моделі) і потреба в постійному живленні (10–30 В), HMT120 має обмежену функціональність, оскільки вимірює лише температуру та вологість, і не підтримує вимірювання освітленності, CO2 та ін., аналогові входи пристрою потребують додаткового обладнання для обробки даних, це значно ускладнює інтеграцію у систему пристроїв, також не дивлячись на гарний захист, тривалий вплив вологості погіршує роботу давачів, та крім цього під впливом температури, точність давачів знижується.

Vaisala HMT120 є високоточним і надійним рішенням для професійного моніторингу мікроклімату, але його висока вартість, відсутність бездротового

зв’язку і стаціонарна конструкція роблять його менш придатним для малих організацій і портативних застосувань. Запропонований пристрій на базі ESP32-WROVER-I перевершує HMT120 за автономністю (до 1–2 місяців), економічною доступністю і можливістю бездротової передачі даних через Wi-Fi, хоча поступається в точності (температура ±0.5°C, вологість ±3–15%) і не має такого рівня захисту від конденсації.

1.3. Testo 160 TH

Testo 160 TH — це Wi-Fi-логер для моніторингу температури та вологості, призначений для використання в музеях, архівах, складах і подібних середовищах, де важливі стабільні кліматичні умови(рис. 1.2).

Рис. 1.2. Зовнішній вигляд Testo 160 TH

Згідно технічної документації для даного пристрою перевагами є: достатня точність вимірювань (температура ±0.5°C у діапазоні -10…+50°C, вологість ±2% RH при 25°C і 20…80% RH (±3% при <20% або >80% RH) [2] така точність дозволяє виконувати моніторинг у малих лабораторіях або в умовах, де потрібен контроль мікроклімату, також ця система підтримує бездротові мережі, для передачі у хмарне сховище Testo Cloud [2].

Також можливий віддалений моніторинг у реальному часі через смартфон або ПК [3], має досить компактні розміри (64×76×22 мм, вага ~100 г) [2], живлення від батарейок (4×AA), і мають середній термін служби до 1 року, також має автоматичні сповіщення через e-mail або SMS (опція доступна в розширеній ліцензії) при показниках, що перевищує заданих меж температури та вологості, процес налаштування виконується просто, через хмарну платформу Testo Cloud [3]. Недоліками Testo 160 TH є: обмежена функціональність, оскільки вимірюється лише температура та вологість та не підтримується вимірювання інших показників, відповідно для комплексного вимірювання потрібні додаткові пристрої або зонди, вартість даного пристрою становить $400, також можливі додаткові витрати на розширену ліцензію Testo Cloud для SMS-сповіщень або створення кількох користувачів [3], велика залежність від Wi-Fi та неможливість передати дані іншим шляхом, має обмежену автономність, батарейки забезпечують автономність до одного року, але більш регулярна передача даних (кожні 5-10 хвилин) зменшує даний термін служби до кількох місяців [2], даний пристрій є досить чутливим до умов, оскільки при тривалому впливі вологості на обладнання, точність може погіршитися, також корпус не має захисту від вологи та пилу, що може бути проблемою при використанні, наприклад, у сільскому господарстві.

Testo 160 TH є ефективним рішенням для музейного середовища завдяки точності вимірювань (±0.5°C, ±2%), компактності, можливості віддаленого моніторингу через Wi-Fi і простоті інтеграції з Testo Cloud. Проте його висока вартість , залежність від Wi-Fi, обмежена функціональність (лише температура і вологість) і недостатній захист корпусу (IP20) роблять його менш універсальним порівняно з запропонованим пристроєм на базі ESP32-WROVER-I, який додатково вимірює освітленість, має кращий захист (IP67) і значно нижчу ціну (~2500–3500 UAH). Testo 160 TH найкраще підходить для стаціонарного використання в музеях із стабільним Wi-Fi, але для польових умов чи бюджетних проєктів він поступається запропонованому рішенню.

1.4 Rotronic HygroPalm HP23

Rotronic HygroPalm HP23 — це портативний пристрій для вимірювання вологості та температури, який використовується в різних галузях, таких як фармацевтика, HVAC, музеї та складське господарство (рис. 1.3).

Рис. 1.3. Зовнішній вигляд Rotronic HygroPalm HP23

Перевагами HygroPalm HP23 є: висока точність вимірювань (температура ±0.1°C (залежить від зонда) [4], вологість ±0.8% RH (залежить від зонда, наприклад, HC2A-S)[4]) дозволяє використовувати пристрій в умовах де потрібен точний контроль, наприклад, у фармацевтичній промисловості, також має широкий робочий діапазон вимірювань (температура від -100°C до +200°C (залежить від зонда HygroClip2) [4], вологість 0…100% RH [4]), такий широкий діапазон дозволяє використовувати пристрій у найрізноманітніших середовищах, від холодильних камер до високотемпературних середовищ пристрій може виконувати обчислення психометричних параметрів (точка роси, морозу, вологий термометр, змішувальне співвідношення тощо) [4], може зберігати велику кількість виміряних даних (до 20000 значень) [4], має інтеграцію з програмним забезпеченням HW4 для аналізу та графічного відображення даних, а також налаштування приладу, також прилад обладнаний функцією

калібрування, HygroPalm HP23 має живлення від батареї 9В, споживання 10 мА (без підсвітки дисплею), в такому режимі автономність складає 48 годин при вимірюваннях кожні 30 секунд, також пристрій має функцію швидкої заміни давачів (hot-swap) без зупинки роботи. Недоліками HygroPalm HP23 є: висока вартість, яка складає $1450, при цьому зонди (наприклад, HC2A-S) продаються окремо, що додатково збільшує витрати (~$200–500) [4], також прилад не підтримує жоден зі стандартів бездротового зв'язку, а для передачі даних потрібне підключення через USB, що є менш зручним для віддаленого моніторингу, автономність пристрою є досить малою в порівнянні з іншими варіантами та запропонованим рішенням, без зондів пристрій не може робити вимірювання, а зонди є досить чутливі до тривалого впливу та потребують регулярного калібрування, програмне забезпечення потребує ручного налаштування через комп'ютер, в той час як у базовій функціональності пристрій обмежений у функціональності (лише базові вимірювання) і кількості записів (250 одиниць на канал), корпус не має захисту, що обмежує використання у складних умовах Rotronic HygroPalm HP23 вирізняється високою точністю (±0.8% RH, ±0.1°C) і універсальністю завдяки широкому діапазону вимірювань (-100…+200°C, 0…100% RH), підтримці різних зондів і можливості обчислення психрометричних параметрів. Він ідеально підходить для професійного використання в музеях, фармацевтичній промисловості чи лабораторіях, де потрібна висока точність і гнучкість.

Однак його висока ціна (60,900 UAH), відсутність бездротового зв'язку, обмежена автономність (48 годин) і залежність від ПЗ HW4 роблять його менш практичним для бюджетних проєктів або віддаленого моніторингу порівняно з запропонованим пристроєм на базі ESP32-WROVER-I. Останній забезпечує кращу автономність (1–2 місяці), захист IP67 і значно нижчу вартість (~2500–3500 UAH), хоча й поступається в точності (±3% RH). HP23 найкраще підходить для стаціонарного використання в контрольованих умовах, але не для польових чи економічних рішень.

1.5 Обґрунтування вибору мікроконтролера

Для створення портативного пристрою моніторингу мікроклімату, який вимірює температуру, вологість і освітленість із передачею даних через Wi-Fi, необхідно обрати мікроконтролер, що поєднує енергоефективність, функціональність, гнучкість інтерфейсів і економічну доступність. У рамках цього аналізу розглянуто два мікроконтролери: ESP32-WROVER-I від Espressif Systems і STM32F103C8T6 від STMicroelectronics, які є популярними для IoT-застосувань. Порівняння їхніх характеристик дозволило обґрунтувати вибір ESP32-WROVER-I (рис. 1.4) як оптимального рішення для проєкту.

Рис. 1.4. Зовнішній вигляд ESP32-WROVER-I

Мікроконтролер ESP32-WROVER-I обраний для портативного пристрою моніторингу мікроклімату, який вимірює температуру, вологість і освітленість з передачею даних через Wi-Fi. Перевагами обраного мікроконтролеру ESP32 є: наявність у ESP32-WROWER-I вбудованого модулю Wi-FI та Bluetooth, завдяки чому можлива передача даних на хмарні платформи (такі як ThingSpeak, HomeAssistant) у форматі JSON через HTTP/MQTT без додаткових модулів [7], що в свою чергу дозволяє виконувати моніторинг показників віддалено, також мікроконтролер є досить енергоефективним, оскільки підтримує режим глибокого сну з низьким

енергоспоживанням (< 10 мкА), завдяки чому автономність пристрою на базі даного контролера може досягати до 1-2 місяців на акумуляторі Li-Po 2000 мА·ч [7], що є більш ефективним ніж наведені професійні рішення, пристрій здатен виконувати швидку обробку сигналів і передачу даних у реальному часі, оскільки обладнаний двома ядрами Xtensa LX6 (тактова частота 240 МГц), 520 кБ SRAM і 4 МБ зовнішньої флеш-пам’яті (PSRAM), що дозволяє ефективно обробляти дані від давачів (фільтрація, усереднення), ESP32-WROWER-I має достатню кількість GPIO, а саме 1-Wire для DS18B20 (GPIO4), АЦП для давачів вологості (GPIO35) і освітленості (GPIO32) [7], аналогові сигнали фоторезистора PDV-P8003 і ємнісного давача вологості можна зчитувати завдяки вбудованому АЦП, є можливість простої і гнучкої розробки програмного забезпечення, оскільки мікроконтролер підтримує платформи Arduino і MicroPython, вартість даного пристрою значно дешевше за промислові контролери і становить $5–7 (210–300 UAH). Недоліками даного мікроконтролеру є: наявність нелінійного шуму у вбудованого АЦП може впливати на вимірювання давачів вологості (±3–15%) і освітленості (±5–20%) [7], проте дана точність для задач проєкту не є критичною, а програмна фільтрація зменшить похибки, чутливість аналогових входів мікроконтролеру вимагає використання RC-фільтрів (10 кОм + 1.5 мкФ) для зменшення шумів [7], у контексті проєкту це вирішується ретельним дизайном схеми (RC-фільтри, короткі доріжки) і не впливає на функціональність у заданих умовах експлуатації (0…+50°C, 20…80% RH), де рівень перешкод типово низький, також для повноцінного функціонування потрібне стабільне бездротове з’єднання

Характеристики STM32F103C8T6

- Процесор: Одноядерний ARM Cortex-M3, 72 МГц.
- Пам’ять: 64 кБ SRAM, 128 кБ флеш-пам’яті.
- Бездротові інтерфейси: Відсутні (потрібні зовнішні модулі, наприклад, ESP8266 для Wi-Fi).

- Інтерфейси: 37 GPIO, SPI, I2C, UART, 1-Wire, 12-бітний АЦП.
- Енергоспоживання: Активний режим ~20–50 мА, режим сну ~2 мкА.
- Живлення: 2.0–3.6 В.
- Вартість: $2–3 (~80–120 UAH).
- Переваги: Нижча ціна порівняно з ESP32-WROVER-I. Висока енергоефективність у режимі сну (<2 мкА) забезпечує тривалу автономність. Одноядерний Cortex-M3 достатній для базової обробки

даних від сенсорів. Широкий набір GPIO і підтримка 1-Wire, I2C, SPI дозволяють підключати DS18B20, ємнісний давач і фоторезистор. Сумісність із STM32CubeIDE і бібліотеками для Arduino спрощує розробку.

- Недоліки: Відсутність вбудованих Wi-Fi і Bluetooth вимагає додаткових модулів (наприклад, ESP8266 за $2–3), що збільшує загальну вартість і складність схеми. Менша обчислювальна потужність (72 МГц) обмежує можливості реального часу, наприклад, складну фільтрацію чи прогнозування. Обмежений обсяг пам’яті ускладнює роботу з великими обсягами даних або складними бібліотеками.

Порівняння мікроконтролерів наведено у табл. 1.1.

Таблиця 1.1

Порівняння мікроконтролерів

Характеристика	ESP32-WROVER-I	STM32F103C8T6
Ціна	$5–7	$2–3
Wi-Fi/Bluetooth	Вбудовані	Відсутні
Процесор	Двоядерний, 240 МГц	Одноядерний, 72 МГц
Енергоспоживання (сну)	<10 мкА	<2 мкА
Пам’ять	520 кБ SRAM, 8 МБ PSRAM	64 кБ SRAM
Інтерфейси	34 GPIO, 1-Wire, I2C, SPI	37 GPIO, 1-Wire, I2C, SPI
Розробка ПЗ	Arduino, MicroPython, ESP-IDF	STM32CubeIDE, Arduino

ESP32-WROVER-I обрано через вбудовані Wi-Fi і Bluetooth, які усувають потребу в додаткових модулях, знижуючи загальну вартість системи

порівняно з STM32F103C8T6 із зовнішнім Wi-Fi-модулем (загальна ціна STM32+ESP8266 ~$4–6, але з вищою складністю інтеграції). Двоядерний процесор і більший обсяг пам'яті дозволяють обробляти дані в реальному часі, включаючи цифрову фільтрацію та прогнозування трендів, що є перевагою для IoT-застосувань. Хоча STM32F103C8T6 енергоефективніший у режимі сну, ESP32-WROVER-I забезпечує достатню автономність (1–2 місяці на акумуляторі 2000 мА·год) завдяки режиму глибокого сну (<10 мкА). Підтримка Arduino і MicroPython спрощує розробку порівняно з STM32CubeIDE, що важливо для швидкої реалізації проєкту. Недоліки ESP32 (нелінійність АЦП, залежність від Wi-Fi) компенсуються програмною обробкою (медіанний фільтр) і схемотехнічними рішеннями (RC-фільтри, IP67-корпус), що відповідає умовам експлуатації (0…+50°C, 20…80% RH).

Таким чином, ESP32-WROVER-I є оптимальним вибором для портативного пристрою моніторингу мікроклімату, поєднуючи економічність, функціональність і гнучкість, що робить його придатним для аграрного сектора.

1.6. Обґрунтування вибору прошивки для мікроконтролера ESP32

Для пристрою, що розробляється моніторингу мікроклімату на базі ESP32-WROVER-I необхідно обрати оптимальну платформу розробки прошивки. Основними альтернативами є Arduino IDE, MicroPython та ESPHome, кожна з яких має свої переваги та обмеження для конкретного застосування в системі автономного моніторингу з батарейним живленням.

1.6.1. Порівняльний аналіз платформ розробки

Arduino IDE

Arduino IDE є найпоширенішою платформою для розробки на ESP32, що базується на мові програмування C++ та фреймворку Arduino. Основні характеристики платформи включають повний контроль над кодом програми, доступ до великої кількості готових бібліотек та активну спільноту розробників.

Переваги Arduino IDE полягають у високій гнучкості програмування, можливості точної оптимізації продуктивності для специфічних завдань, повному доступі до всіх функцій ESP32 та обширній документації з прикладами коду. Платформа забезпечує ефективне використання ресурсів мікроконтролера завдяки компільованому коду.

Недоліки включають необхідність ручного програмування всіх функцій системи: зчитування давачів, налаштування Wi-Fi підключення, реалізацію протоколів передачі даних, програмування режимів енергозбереження та обробку помилок. Розробка повнофункціонального пристрою моніторингу потребує значних часових затрат на написання та налагодження коду, що може становити 2-3 місяці для досягнення промислового рівня надійності.

MicroPython

MicroPython представляє інтерпретовану версію мови Python, адаптовану для мікроконтролерів ESP32. Платформа дозволяє використовувати знайомий Python-синтаксис та підтримує інтерактивну розробку через REPL-інтерфейс.

Переваги MicroPython включають простоту освоєння для розробників, знайомих з Python, швидке прототипування завдяки інтерактивному режиму, відсутність необхідності компіляції коду та можливість динамічної зміни програми. Платформа підтримує основні протоколи IoT та має готові драйвери для популярних давачів.

Критичні недоліки для автономного пристрою полягають у підвищеному енергоспоживанні через інтерпретацію коду, що може скоротити автономність з планованих 1-2 місяців до кількох тижнів. MicroPython менш ефективно працює з режимами глибокого сну ESP32, має обмежені можливості оптимізації продуктивності порівняно з компільованим кодом та потребує більше оперативної пам'яті для виконання програм.

ESPHome

ESPHome є спеціалізованою системою прошивки для ESP8266/ESP32, що використовує декларативний підхід на основі YAML-конфігурації без необхідності програмування. Система орієнтована на створення IoT-пристроїв з автоматичною інтеграцією в екосистеми розумного дому.

Переваги ESPHome включають кардинальне спрощення розробки через конфігураційні файли замість програмування, автоматичну оптимізацію енергоспоживання з підтримкою глибокого сну, вбудовані механізми стабільності (автоматичне перепідключення Wi-Fi, watchdog-таймер, OTA-оновлення) та готові алгоритми фільтрації даних давачів. Система забезпечує автоматичну інтеграцію з Home Assistant та підтримує професійні функції безпеки.

Обмеження ESPHome полягають у меншій гнучкості порівняно з повноцінним програмуванням, залежності від підтримуваних компонентів у системі та необхідності використання зовнішніх платформ для складних алгоритмів обробки даних. Проте для типових завдань моніторингу мікроклімату ці обмеження не є критичними.

1.6.2. Вибір платформи розробки

Час розробки: Arduino IDE потребує 2-3 місяці для створення надійного пристрою, MicroPython - 1-2 місяці з урахуванням оптимізації енергоспоживання, ESPHome - 2-3 тижні завдяки конфігураційному підходу.

Енергоефективність: Arduino IDE забезпечує найкращу ефективність при правильній оптимізації, MicroPython має підвищене споживання через інтерпретацію, ESPHome автоматично оптимізує споживання до рівня, близького до Arduino IDE.

Надійність: Arduino IDE потребує ручної реалізації всіх механізмів стабільності, MicroPython має обмежені можливості обробки критичних ситуацій, ESPHome включає вбудовані механізми надійності.

Підтримка та розвиток: Всі три платформи мають активні спільноти, але ESPHome спеціально орієнтована на IoT-застосування з регулярними оновленнями функціональності.

На основі проведеного аналізу для пристрою моніторингу мікроклімату оптимальним рішенням є використання ESPHome. Цей вибір обґрунтовується наступними факторами:

Оптимальне співвідношення часу розробки та функціональності: При необхідності швидкого створення надійного пристрою ESPHome забезпечує скорочення часу розробки в 4-5 разів порівняно з Arduino IDE при збереженні всіх необхідних функцій моніторингу.

Автоматичне забезпечення енергоефективності: Для автономного пристрою критично важливо мінімальне енергоспоживання. ESPHome автоматично налаштовує режим глибокого сну ESP32-WROVER-I з споживанням менше 10 мкА, що забезпечує цільову автономність 1-2 місяці без ручного програмування складних алгоритмів енергозбереження.

Вбудована надійність: Пристрій працюватиме в польових умовах з обмеженим фізичним доступом, тому автоматичні механізми відновлення

з'єднання, watchdog-захист та OTA-оновлення є критично важливими. ESPHome забезпечує ці функції без додаткової розробки.

Готова екосистема: Інтеграція з Home Assistant дозволяє негайно отримати повнофункціональну систему візуалізації та аналізу даних, що особливо цінно для початкового етапу впровадження в малих аграрних господарствах.

Перспективи розвитку: Архітектура ESPHome з підтримкою REST API та MQTT забезпечує можливість майбутньої інтеграції з власними додатками без переписування прошивки пристрою.

Вибір ESPHome як платформи для розробки прошивки пристрою моніторингу мікроклімату обґрунтовується оптимальним поєднанням швидкості розробки, енергоефективності, надійності та можливостей інтеграції. Хоча Arduino IDE забезпечує максимальну гнучкість, а MicroPython - простоту прототипування, ESPHome найкраще відповідає специфічним вимогам автономного IoT-пристрою з необхідністю швидкого впровадження та довгострокової експлуатації в польових умовах.

Висновок до розділу

Огляд систем моніторингу параметрів зовнішнього середовища показав, що вибір рішення залежить від масштабу, бюджету та вимог до точності в умовах аграрного сектору. Промислові пристрої, такі як Vaisala HMT120, Testo 160 TH і Rotronic HygroPalm HP23, вирізняються високою точністю (температура ±0.1–0.5°C, вологість ±0.8–2% RH) і надійністю в широкому діапазоні умов (–40…+80°C, 0…100% RH), а також захистом IP65–IP68, що робить їх ідеальними для великих аграрних комплексів зі стандартами GMP чи ISO [1, 2, 4]. Проте їхня висока вартість (400–1200 євро), складність інтеграції та залежність від спеціалізованого ПЗ (Testo Cloud, HW4) обмежують доступність для малих проєктів [1, 3, 6].

Для бюджетних застосувань IoT-сенсори (BME280, DHT22, BH1750, TSL2561) пропонують економічне рішення (10–50 євро) з достатньою точністю (±1°C, ±3% RH, ±10–20% lx), що підтверджується IEEE Sensors Journal, і легко інтегруються з платформами Arduino чи Raspberry Pi. Вони підходять для автоматизації поливу чи освітлення в малих фермах, хоча потребують калібрування та захисту від агресивних умов.

Система, що розробляється на ESP32-WROVER-I займає проміжне місце між промисловими системами та бюджетними IoT-рішеннями. Він значно дешевший за промислові пристрої (вартість ~2500–3500 UAH проти 16,800–60,900 UAH для Vaisala, Testo, Rotronic) і забезпечує автономність (1–2 місяці), бездротову передачу через Wi-Fi і захист IP67, перевершуючи Testo 160 TH і Rotronic HygroPalm HP23 за вартістю (~2500–3500 UAH) і універсальністю (додатково вимірює освітленість) [2, 4, 7]. Обмеження, пов’язані з точністю давачів оригінального дизайну (±3–15% RH, ±5–20% lx) і залежністю від Wi-Fi, є некритичними для задач проєкту, оскільки компенсуються програмною обробкою і відповідністю умовам експлуатації (0…+50°C, 20…80% RH). Таким чином, ESP32-WROVER-I є оптимальним вибором для малих аграрних і освітніх ініціатив, поєднуючи економічність, гнучкість і функціональність.Важливим аспектом вибору ESP32-WROVER-I є його здатність адаптуватися до різноманітних умов експлуатації завдяки модульному підходу до розробки. Наприклад, використання давача температури DS18B20, ємнісного давача вологості та фоторезистора PDV-P8003 дозволяє налаштувати пристрій для конкретних потреб, таких як контроль умов у теплиці чи лабораторії. Крім того, захист корпусу IP67 забезпечує стійкість до пилу та вологи, що є критично важливим для використання в сільському господарстві, де можливі перепади вологості та забруднення. Це дає змогу застосовувати пристрій як мобільний пристрій, де промислові рішення, такі як Rotronic HygroPalm HP23, можуть бути менш практичними через відсутність захисту корпусу та високу ціну.

Ще однією перевагою запропонованого рішення є його відкрита архітектура, яка дозволяє легко модифікувати систему. Наприклад, програмне забезпечення на базі Arduino або MicroPython дає можливість швидко додавати нові функції, такі як інтеграція з іншими платформами (Google Sheets, Blynk) або підключення додаткових давачів (CO2, тиску). Така гнучкість особливо цінна для освітніх проєктів, де студенти можуть експериментувати з різними конфігураціями, вивчаючи основи IoT і сенсорних технологій. Водночас промислові пристрої, такі як Vaisala HMT120, хоча й пропонують високу точність, обмежені у можливостях модифікації через закриту екосистему та потребу в спеціалізованому обладнанні для інтеграції.

Крім того, економічна доступність ESP32-WROVER-I відкриває можливості для масштабування рішення. Наприклад, для невеликої ферми чи кількох навчальних класів можна розгорнути мережу з кількох пристроїв за значно меншу суму, ніж коштує один промисловий логер, такий як Testo 160 TH. Це дозволяє одночасно моніторити кілька зон (наприклад, різні теплиці чи музейні зали) без значних фінансових витрат. Хоча залежність від Wi-Fi може

бути обмеженням у віддалених районах, використання альтернативних методів передачі даних або локального зберігання даних на SD-карті може вирішити цю проблему, зберігаючи переваги системи.

Порівняння мікроконтролерів показало, що ESP32-WROVER-I перевершує STM32F103C8T6 за функціональністю завдяки вбудованим Wi-Fi і Bluetooth, більшій обчислювальній потужності та підтримці Arduino/MicroPython, що спрощує розробку. Хоча STM32 дешевший і енергоефективніший, потреба в додаткових модулях зв’язку знижує його економічну вигоду та ускладнює інтеграцію.

Місце пристрою, що розробляється на ринку:

- Дешевший за промислові системи (Vaisala HMT120, Testo 160 TH, Rotronic HP23), що робить його доступнішим.

- Точніший за бюджетні IoT-рішення на базі DHT22 (±5% RH) завдяки програмній обробці та якіснішим сенсорам (DS18B20, фоторезистор PDV-P8003).
- Універсальніший за Testo 160 TH і Rotronic HP23, оскільки вимірює освітленість і підтримує модульне розширення.
- Автономніший за більшість IoT-систем (1–2 місяці проти кількох тижнів) і захищеніший (IP67 проти IP20 у Testo).

Таким чином, пристрій на базі ESP32-WROVER-I є оптимальним рішенням для малих аграрних ініціатив, поєднуючи економічність, гнучкість і достатню функціональність. Його відкрита архітектура дозволяє адаптувати систему до різних умов (теплиці, лабораторії, музеї), а підтримка сучасних протоколів зв'язку забезпечує інтеграцію з хмарними сервісами. Для віддалених регіонів без Wi-Fi можливе додавання LoRa-модулів або локального зберігання даних, що розширює сферу застосування. Порівняно з промисловими рішеннями, пристрій поступається в точності, але перевершує за вартістю та універсальністю, що робить його перспективним для бюджетних проєктів.

2. РОЗРОБКА ТА РОЗРАХУНОК СИСТЕМИ МОНІТОРИНГУ ПАРАМЕТРІВ ЗОВНІШНЬОГО СЕРЕДОВИЩА

2.1. Структурна схема

Представлена структурна схема (рис. 2.1) відображає детальну архітектуру розробленої системи та взаємозв'язки між усіма функціональними блоками, що забезпечують повний технологічний цикл — від збору первинних даних до їх обробки та бездротової передачі на кінцеві пристрої користувача.

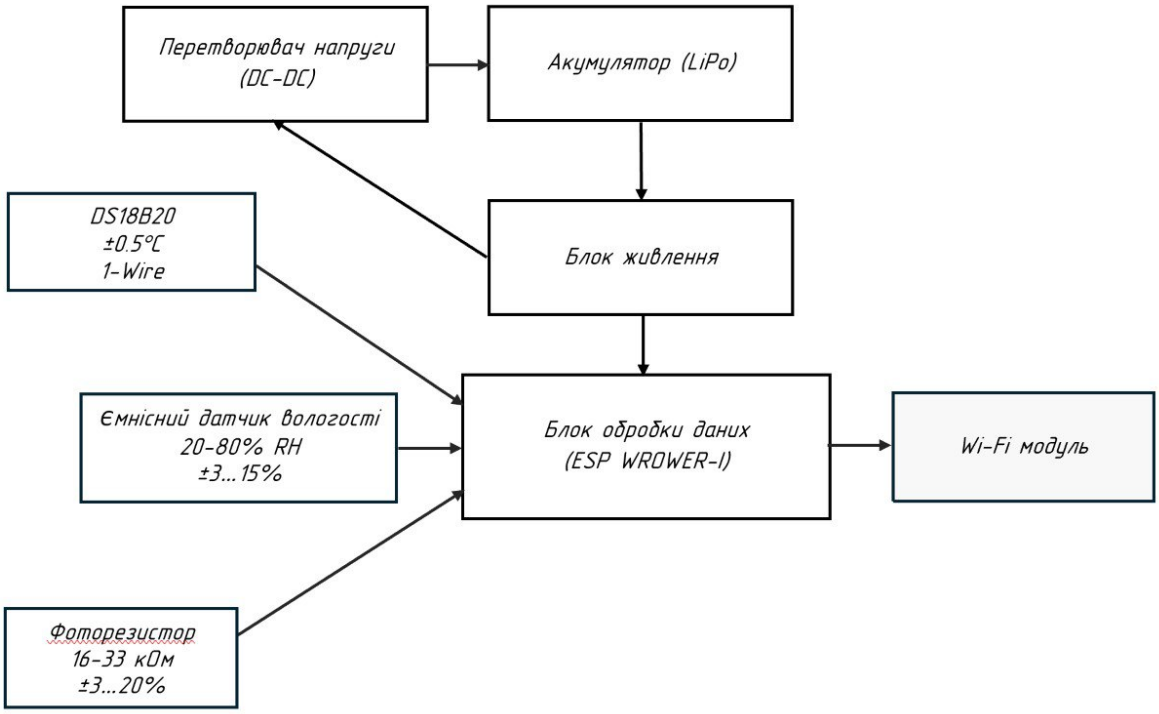


Рис. 2.1. Зовнішній вигляд структурної схеми

2.1.1.Система електроживлення та енергозабезпечення

Для забезпечення тривалої автономної роботи пристрою в різноманітних умовах експлуатації була спроєктована комплексна система енергозабезпечення, що складається з таких компонентів:

1. **Перетворювач напруги (DC-DC)**

Взаємодія: Перетворювач отримує енергію від акумулятора через блок живлення та подає стабілізовану напругу 3.3 В на мікроконтролер і сенсори.

Захист: Вбудовані механізми захисту від перенапруги, короткого замикання та перевантаження запобігають пошкодженню компонентів. Обмеження струму захищає акумулятор від надмірного розряду, сигналізуючи мікроконтролеру про низький рівень заряду через АЦП (GPIO34).

2. Акумулятор (LiPo) - центральним елементом системи енергозабезпечення є високоємнісний літій-полімерний акумулятор.

Взаємодія: Акумулятор подає енергію на перетворювач DC-DC через блок живлення. Мікроконтролер моніторить рівень заряду акумулятора через АЦП, отримуючи дані про напругу. При критичному рівні заряду (нижче 3.0 В) система переходить у режим глибокого сну, сигналізуючи користувачу через Wi-Fi або локальний індикатор.

Зворотний зв’язок: Підключений до акумулятора, забезпечує контроль зарядки через USB-C і надсилає сигнали про стан заряду (заряджено/заряджається) на GPIO мікроконтролера.

3. Блок живлення - цей блок забезпечує розподіл енергії між усіма функціональними компонентами системи з урахуванням їх миттєвих потреб та пріоритетності.

Взаємодія: Отримує стабілізовану напругу 3.3 В від DC-DC перетворювача та розподіляє її на живлення ESP32-WROVER-I (VCC), сенсорів (через керовані MOSFET-лінії) і Wi-Fi-модуля (інтегрованого в ESP32). Мікроконтролер керує розподілом енергії, активуючи сенсори лише під час вимірювань, що знижує споживання.

Зворотний зв’язок: Сигнали про стан живлення (наприклад, низький заряд) передаються на мікроконтролер через АЦП, дозволяючи адаптувати режими роботи.

2.1.2.Система збору даних та сенсорна підсистема

Для забезпечення комплексного моніторингу параметрів навколишнього середовища інтегровано у систему три типи давачів:

1. DS18B20 (±0,5°C, 1-Wire)

Взаємодія: Давач передає цифрові дані температури до ESP32-WROVER-I через єдину сигнальну лінію. Мікроконтролер надсилає команди для ініціалізації вимірювань і зчитування даних. Живлення (3.3 В) подається від блоку живлення через керовану лінію GPIO, що дозволяє відключати давач у режимі сну.

Зворотний зв’язок: Відсутній, оскільки працює в односторонньому режимі (передача даних до мікроконтролера). У разі помилки з’єднання (наприклад, обрив) мікроконтролер виявляє аномалію через таймаут.

2. Ємнісний давач вологості (20-80% RH, ±3...15%) - для контролю відносної вологості повітря використано ємнісний давач вологості. Робочий діапазон давача становить від 20% до 80% відносної вологості, що відповідає більшості типових умов експлуатації системи. Точність вимірювань варіюється від ±3% при нормальних умовах до ±15% в екстремальних умовах високої вологості та температури.

Зворотний зв’язок: Мікроконтролер компенсує перехресний вплив температури на вимірювання вологості.

2.1.3.Система обробки та передачі даних

Для ефективної обробки та передачі зібраних даних використано високопродуктивний обчислювальний модуль на базі сучасного мікроконтролера та інтегровано його з бездротовою системою зв'язку:

1. Блок обробки даних (ESP WROWER-1)

Зворотний зв’язок: Аналізує стан акумулятора (через АЦП, GPIO34) і адаптує режими роботи (наприклад, зменшує частоту передачі даних при низькому заряді).

Виявлені аномалії (наприклад, різке падіння температури) сигналізуються користувачу через Wi-Fi.

2. Wi-Fi модуль - для забезпечення бездротової передачі оброблених даних до кінцевих пристроїв користувача або хмарних сервісів використано інтегрований у мікроконтролер Wi-Fi модуль, що підтримує стандарти

IEEE 802.11 b/g/n та забезпечує швидкість передачі даних до 150 Мбіт/с. Модуль підтримує роботу як у режимі клієнта (для підключення до існуючих мереж), так і в режимі точки доступу (для створення приватної мережі при відсутності доступної інфраструктури).

Взаємодія: Отримує оброблені дані від блоку обробки та передає їх на хмарні сервіси або локальні пристрої через MQTT/HTTP. У режимі точки доступу створює локальну мережу для прямого підключення. Живлення (3.3 В) подається від блоку живлення, а активація модуля керується мікроконтролером для економії енергії.

Зворотний зв’язок: Статус з’єднання (підключено/відключено) передається на мікроконтролер, який буферизує дані в PSRAM у разі втрати зв’язку та відправляє їх після відновлення мережі.

2.1.4. Інтеграція компонентів та системна взаємодія

Всі розроблені функціональні блоки системи інтегровані у єдину систему на основі розробленої архітектури взаємодії компонентів:

1. Системна інтеграція - для забезпечення надійного з'єднання всіх компонентів розроблено оригінальну топологію друкованої плати з

оптимізованим розташуванням елементів та мінімізацією довжини сигнальних ліній. Особлива увага приділена розділенню аналогових та цифрових сигналів для мінімізації перехресних завад.

2. Програмне забезпечення - для керування всіма компонентами системи розроблено комплексне програмне забезпечення, що забезпечує паралельне виконання процесів збору, обробки та передачі даних.

Програмний комплекс включає в себе модулі взаємодії з давачами, модуль обробки та аналізу даних, модуль керування енергоспоживанням, модуль бездротової передачі даних. Для взаємодії з користувачем було створено веб-інтерфейс з адаптивним дизайном, що дозволяє отримувати доступ до даних моніторингу з будь-якого пристрою, підключеного до мережі.

3. Алгоритми обробки даних - для підвищення достовірності результатів моніторингу розроблено комплексні алгоритми обробки даних, що включають в себе цифрову фільтрацію сигналів, компенсацію

перехресного впливу параметрів, виявлення та відсіювання аномальних значень, а також прогнозування трендів зміни контрольованих параметрів на основі методів машинного навчання. Особлива увага приділена алгоритмам енергозбереження, що дозволяють оптимізувати роботу системи в залежності від поточних умов експлуатації.

2.2. Розробка принципової схеми

Розроблено принципову електричну схему автономної системи моніторингу параметрів навколишнього середовища з бездротовою передачею даних (рис. 2.2).

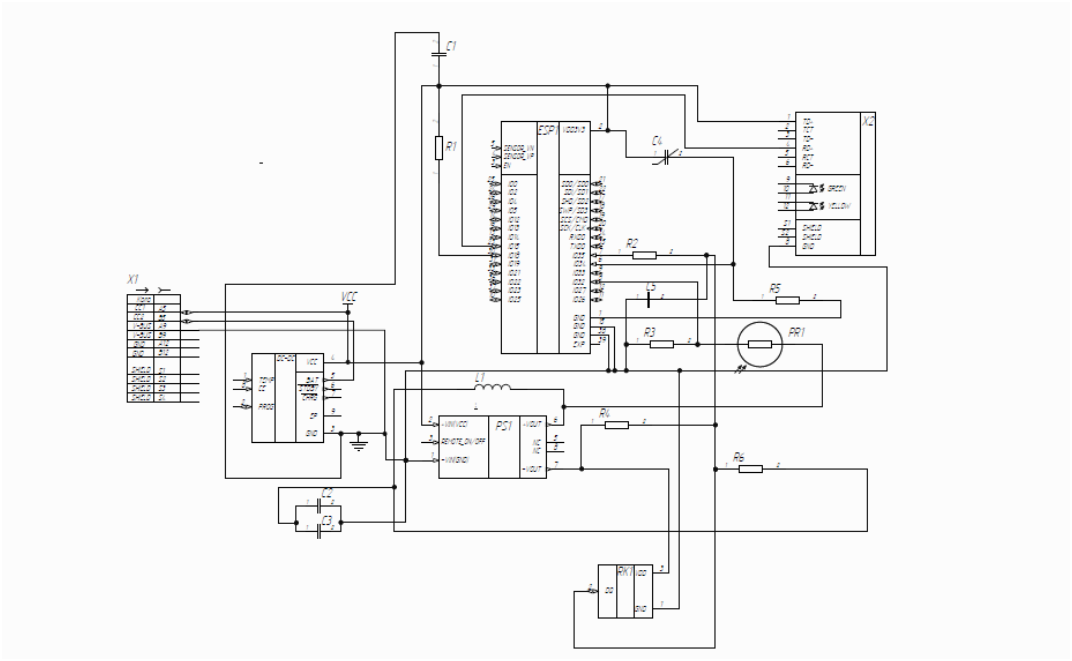


Рис. 2.2 Принципова схема

Центральним елементом є мікроконтролер ESP32-WROVER-I з двоядерним процесором (240 МГц), 4 МБ флеш-пам’яті, 8 МБ PSRAM, вбудованими Wi-Fi та Bluetooth, 34 GPIO та інтерфейсами SPI, I2C, UART. Для стабільної роботи передбачено фільтруючі конденсатори (0,1 мкФ, 10 мкФ) та резистор-перемичку (100 Ом) для лінії RESET.

Система електроживлення включає DC-DC перетворювач на TP4056 для зарядки акумулятора та стабілізації напруги 3,3 В, з конденсаторами (0,1 мкФ, 10 мкФ), котушкою індуктивності (10 мкГн) та резистивним дільником (100 Ом). Мікросхема захисту забезпечує контроль перезаряду (4,2 В), глибокого розряду (2,8 В) та перевантаження. Акумулятор підключається через USB-C.

Для збору даних використано давач температури DS18B20 (1-Wire, резистор 10 кОм, конденсатор 0,1 мкФ), ємнісний давач вологості (АЦП, резистор 10 кОм, конденсатор 0,1 мкФ) та фоторезистор PDV-P9003-16 (аналоговий вхід). Бездротова передача даних реалізована через Wi-Fi модуль ESP32. Додаткові інтерфейси включають UART для програмування через

роз’єм X2 з лініями RESET і BOOT. Для захисту передбачено LC-фільтри на сигнальних лініях. Схема оптимізована для енергоефективності, завадостійкості (роздільні землі, екранування), масштабованості та надійності.

2.2.1. Мікроконтролер ESP32-WROVER-I

Мікроконтролер ESP32-WROVER-I є центральним елементом схеми портативного пристрою моніторингу мікроклімату. Він відповідає за зчитування даних із давачів (температура, вологість, освітленість), їхню обробку (фільтрація, усереднення) і передачу через Wi-Fi на хмарну платформу (ThingSpeak). ESP32-WROVER-I працює на напрузі 3.3V, яку забезпечує лінійний стабілізатор (LDO) AMS1117-3.3, що отримує вхідну напругу 5V від DC-DC перетворювача MT3608. Для стабільності живлення мікроконтролера використовуються конденсатори для розв’язки, а також

враховується енергоспоживання в різних режимах роботи. Нижче наведено детальний опис роботи цього модуля з розрахунками.

Основні характеристики ESP32-WROVER-I

ESP32-WROVER-I (двоядерний Xtensa LX6, 240 МГц, 4 МБ флеш, 8 МБ PSRAM, Wi-Fi 802.11 b/g/n) [7]. Для роботи з давачами використовуються:

GPIO4 для 1-Wire (DS18B20, давач температури);

GPIO32 і GPIO35 для аналогових входів АЦП

Вбудований АЦП (12 біт, діапазон 0–3.3V) для зчитування аналогових сигналів.

Енергоспоживання залежить від режиму роботи:

У режимі глибокого сну: ~10 мкА;

У активному режимі (Wi-Fi передача): до 100 мА;

У режимі зчитування даних (без Wi-Fi): ~20 мА [7].

Система живлення ESP32-WROVER-I

ESP32-WROVER-I живиться від напруги 3.3V, яка формується стабілізатором AMS1117-3.3 із вхідної напруги 5V, що забезпечується DC-DC перетворювачем MT3608 (рис. 2.3).

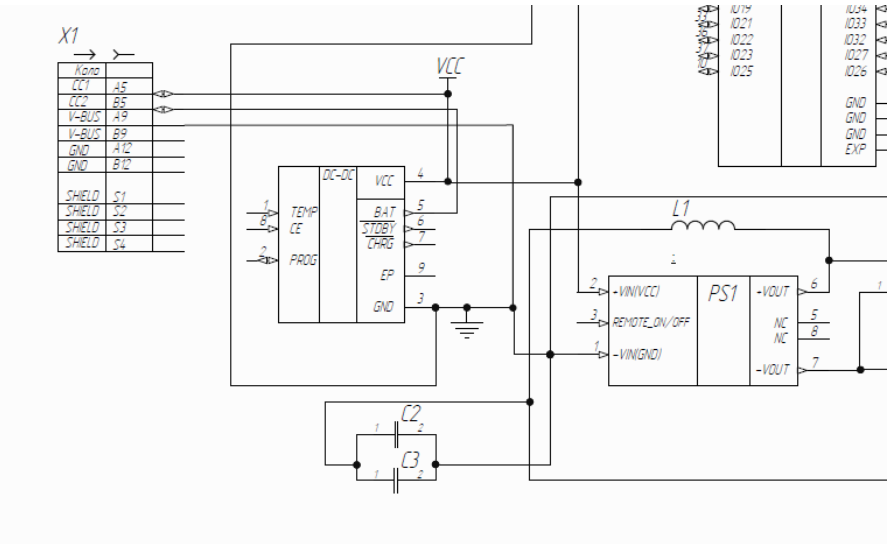


Рис. 2.3 Система живлення схеми

Для стабільності живлення між виводом VDD (3.3V) і землею встановлені два конденсатори: керамічний 0.1 мкФ для високочастотних

перешкод і електролітичний 10 мкФ для низькочастотних пульсацій. Ці конденсатори необхідні, оскільки Wi-Fi-модуль ESP32 генерує імпульсні перешкоди, які можуть впливати на стабільність роботи.

Розрахунок розділових конденсаторів

Wi-Fi-модуль ESP32 генерує високочастотні перешкоди на частотах ~10–100 кГц, а також імпульси від переключення (до 2.4 ГГц). Для їхнього згладжування використовується керамічний конденсатор $C_{decouple} = 0.1$ μF, який

ефективно фільтрує високочастотні шуми. Частота зрізу f_{cutoff} для такого конденсатора залежить від його ємності та еквівалентного послідовного опору (ESR):

$$f_{cutoff} = \frac{1}{2\pi \cdot 0,1 \cdot 10 \cdot 10^{-6}} \approx \frac{1}{6,2832 \cdot 10^{-6}} \approx 159\ кГц.$$

Це значення забезпечує згладжування низькочастотних шумів, що можуть виникати при зміні навантаження (наприклад, під час активації Wi-Fi). Таким чином, комбінація 0.1 мкФ і 10 мкФ забезпечує стабільність живлення в широкому діапазоні частот.

Розрахунок падіння напруги на AMS1117-3.3

Стабілізатор AMS1117-3,3 потребує мінімального перепаду напруги (dropout voltage) ~1.2V для стабільної роботи. Вхідна напруга від MT3608 становить 5V, тому:

$$V_{drop} = V_{in} - V_{out} = 5 - 3,3 = 1,7B.$$

Це значення перевищує мінімальний перепад 1.2V, що забезпечує стабільну роботу стабілізатора. Максимальний струм ESP32 у активному режимі — 100 мА, тому розсіювана потужність на AMS1117:

$$P_{diss} = V_{drop} \cdot I_{max} = 1,7 \cdot 0,1 = 0,17\ Bm.$$

Температурний нагрів стабілізатора (без радіатора, тепловий опір $R_{\theta JA} \approx$ 100 °C/Вт):

$$\Delta T = P_{diss} \cdot R_{\theta TA} = 0,17 \cdot 100 = 17℃.$$

При температурі навколишнього середовища 25°C температура стабілізатора складе ~42°C, що значно нижче максимального значення 125°C, тому додаткове охолодження не потрібне.

Wi-Fi-модуль

Wi-Fi-модуль ESP32 працює на частоті 2.4 ГГц і забезпечує передачу даних через HTTP/MQTT. Для стабільної роботи потрібна антена з імпедансом 50 Ом, що забезпечується вбудованою антеною на модулі ESP32-WROVER-I. Потужність передачі становить ~20 дБм (100 мВт), що забезпечує дальність зв'язку до 100 м у приміщенні [7]. Для зменшення перешкод від Wi-Fi на аналогові входи (GPIO32, GPIO35) використовуються RC-фільтри.

2.2.2. Давач температури DS18B20 та його інтеграція

Давач температури DS18B20 є ключовим компонентом схеми портативного пристрою моніторингу мікроклімату, який забезпечує вимірювання температури в діапазоні від -10°C до +85°C із точністю ±0.5°C. Він підключений до мікроконтролера ESP32-WROVER-I через інтерфейс 1-Wire, використовуючи пін GPIO4. Для забезпечення стабільності зв'язку та захисту від електромагнітних перешкод (EMI) у схемі передбачені підтягуючий резистор і RC-фільтр. Нижче наведено детальний опис роботи цього модуля з відповідними розрахунками.

Основні характеристики DS18B20

DS18B20 — це цифровий давач температури з інтерфейсом 1-Wire, який дозволяє підключати кілька давачів до однієї шини з унікальною адресацією.

Основні параметри [8]:

- Діапазон вимірювання: -10…+85°C (загальний діапазон -55…+125°C);
- Точність: ±0.5°C у діапазоні -10…+85°C;
- Роздільна здатність: 12 біт (0.0625°C);
- Час конвертації: ~750 мс при 12-бітній роздільній здатності;

- Споживаний струм: ~1 мА під час конвертації, <1 мкА у режимі очікування;
- Напруга живлення: 3.0–5.5V (у схемі використовується 3.3V).

Давач підключений у паразитному режимі живлення (2-провідна схема: DQ і GND), де живлення забезпечується через підтягуючий резистор на шині 1-Wire.

Підключення DS18B20 до ESP32-WROVER-I

DS18B20 підключений до GPIO4, який налаштований як вхід/вихід для 1-Wire протоколу (рис. 2.4.).

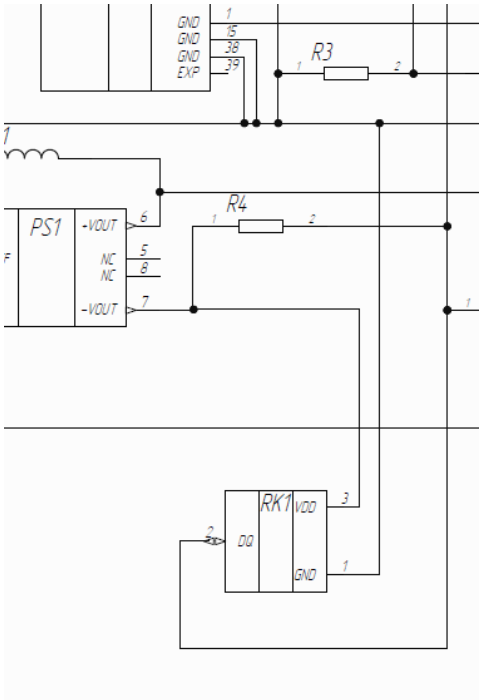


Рис 2.4. Підключення DS18B20 (RK1) до схеми

Для забезпечення логічного рівня "1" на шині використовується підтягуючий резистор $R_{pull\text{-}up}$ = 4,7 кОм, підключений між виводом даних (DQ) і напругою 3.3V. Довжина шини становить ~10 см, що дозволяє уникнути значних паразитних ємностей і забезпечує стабільний зв’язок.

Розрахунок RC-фільтра для захисту від EMI

Шина 1-Wire чутлива до електромагнітних перешкод (EMI), які можуть виникати від Wi-Fi-модуля ESP32 (2.4 ГГц) або DC-DC перетворювача MT3608 (1.2 МГц). DS18B20 працює зі швидкістю передачі ~15.4 кбіт/с, що відповідає частоті сигналу ~15.4 кГц. Для захисту від високочастотних шумів (вище 50 кГц) додано RC-фільтр між виводом DQ і землею.

Формула для частоти зрізу RC-фільтра:

$$f_c = \frac{1}{2\pi \cdot R \cdot C}.$$

Вибираємо R = 220 Ом, щоб мінімізувати вплив на цифровий сигнал, і розраховуємо ємність для f_c = 50 кГц:

$$C = \frac{1}{2\pi \cdot R \cdot f_c} = \frac{1}{2\pi \cdot 220 \cdot 50000} \approx \frac{1}{6,9115 \cdot 10^7} \approx 1,45 \cdot 10^{-8} Ф = 14,\ нФ.$$

Вибираємо стандартне значення C = 15 нФ. Перераховуємо частоту зрізу:

$$f_c = \frac{1}{2\pi \cdot 220 \cdot 15 \cdot 10^{-9}} \approx \frac{1}{2.073 \cdot 10^{-5}} \approx 48,2\ кГц.$$

Частота зрізу 48.2 кГц дозволяє пропускати сигнал 1-Wire (15.4 кГц), але ефективно відфільтровує високочастотні шуми (>50 кГц). Вплив паразитної ємності доріжок (~20 пФ) додає еквівалентну ємність:

$$f_c = \frac{1}{2\pi \cdot 220 \cdot 15,02 \cdot 10^{-9}} \approx 48,1\ кГц.$$

Різниця незначна, тому RC-фільтр із R = 220 Ом і C = 15 нФ є оптимальним

Енергоспоживання DS18B20

DS18B20 споживає ~1 мА під час конвертації (750 мс) і <1 мкА у режимі очікування. У схемі пристрій вимірює температуру кожні 5 хвилин (300 секунд). Загальний час активності за цикл (10 зразків):

$$t_{active,\ DS18B20} = 10 \cdot 0,75 = 7,5\ с,$$

Середнє споживання за цикл:

$$I_{avg,DS18B20} = \frac{I_{active} \cdot t_{active} + I_{standby} \cdot t_{standby}}{t_{total}} = \frac{1 \cdot 7{,}5 + 0{,}001 \cdot (300 - 7{,}5)}{300} \approx 0{,}0275\ мА\cdot$$

Це значення враховується при розрахунку загальної автономності системи. Споживання DS18B20 є незначним порівняно з ESP32 (3.43 мА у середньому), тому не впливає суттєво на загальну автономність.

Час зчитування та обробки даних

Час конвертації одного вимірювання температури становить 750 мс при 12-бітній роздільній здатності. Для підвищення точності виконується усереднення 10 зразків:

$$t_{total,DS18B20} = 10 \cdot 0,75 = 7,5\ с.$$

Цей час є основною складовою активного режиму ESP32, оскільки зчитування аналогових сигналів (вологість, освітленість) займає значно менше часу (~0.2 мс). Бібліотека DallasTemperature забезпечує ефективне зчитування через 1-Wire, а унікальна адресація DS18B20 дозволяє підключати кілька давачів до однієї шини без конфліктів.

Оцінка похибок вимірювання

Точність DS18B20 становить ±0.5°C у діапазоні -10…+85°C, що відповідає вимогам проєкту (±0.5–1°C). Додаткові похибки можуть виникати через:

- Шуми на шині 1-Wire: RC-фільтр (220 Ом, 15 нФ) мінімізує їхній вплив;
- Температурний дрейф: DS18B20 має мінімальний дрейф (<0.1°C/рік), що не впливає на короткострокові вимірювання;
- Довжину шини: при 10 см паразитні ефекти незначні, але при збільшенні до 1 м може знадобитися зменшення $R_{pull-up}$ до 2.2 кОм.

2.2.3. Ємнісний давач вологості

Ємнісний давач вологості є одним із ключових компонентів схеми портативного пристрою моніторингу мікроклімату. Він призначений для вимірювання відносної вологості повітря (RH) у діапазоні 20–80% із похибкою ±3–15%. Давач підключений до GPIO35 мікроконтролера ESP32-WROVER-I через вбудований аналого-цифровий перетворювач (АЦП). Для вимірювання

використовується метод оцінки часу заряду/розряду ємкості, який залежить від вологості, а для захисту від шумів додано RC-фільтр. Нижче наведено детальний опис роботи цього модуля з відповідними розрахунками.

Основні характеристики ємнісного давача вологості

Ємнісний давач складається з двох паралельних пластин (електродів), між якими повітря діє як діелектрик. Відносна вологість впливає на діелектричну проникність повітря (ε_r), що змінює ємність давача. Основні параметри:

- Діапазон вимірювання: 20–80% RH;
- Похибка: ±3–15% (залежить від калібрування та умов експлуатації);
- Розміри пластин: A = 10 см^2 (2×5 см);
- Відстань між пластинами: d = 1 мм;
- Діелектрична проникність: $\varepsilon_r \approx 1$ (сухе повітря, 0% RH), $\varepsilon_r \approx 1.2$ (80% RH);
- Робочий діапазон температур: 0…+50°C.

Давач підключений до GPIO35 через резистор R = 1 МОм, що формує RC-ланку для вимірювання часу заряду/розряду. Зміна ємності давача впливає на час заряду, який вимірюється АЦП ESP32.

Схема підключення

Ємнісний давач працює за принципом зміни ємності залежно від вологості повітря (рис. 2.5).

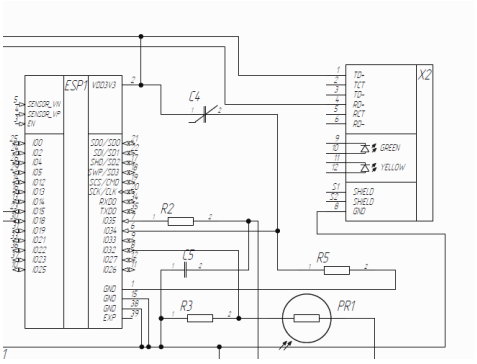


Рис. 2.5. Підключення ємнісного давача вологості (C4 та R5)

Збільшення вологості підвищує діелектричну проникність (ε_r), що призводить до зростання ємності між пластинами.

Давач підключений до GPIO35, який налаштований як вхід для АЦП, а також періодично перемикається в режим виходу для заряду/розряду ємкості. Резистор R = 1 МоМ з'єднаний між GPIO35 і землею, формуючи RC-ланку. Алгоритм вимірювання:

- GPIO35 налаштовується як вихід і встановлюється в "1" (3.3В) для заряду ємкості.
- GPIO35 перемикається в режим входу (АЦП), і вимірюється час, за який напруга на ємкості падає до порогового значення (наприклад, 1.65В).
- Час розряду пропорційний вологості, що дозволяє визначити RH після калібрування.

Для захисту від високочастотних шумів (наприклад, від Wi-Fi-модуля ESP32) між GPIO35 і землею додано RC-фільтр.

Розрахунок ємності давача

Ємність між пластинами розраховується за формулою для плоского конденсатора:

$$C = \varepsilon_0 \cdot \varepsilon_t \frac{A}{d},$$

де:

- $\varepsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12} Ф/м$ (діелектрична стала вакууму);
- ε_r — відносна діелектрична проникність (залежить від вологості);

- A = 10 см^2 = 0.001 м^2 (площа пластин);
- d = 1 мм = 0.001 м (відстань між пластинами). При 0% RH ($\varepsilon_r \approx 1$):

$$C_{0\%} = 8,85 \cdot 10^{-12} \cdot 1 \cdot \frac{0.001}{0.001} = 8,85 \cdot 10^{-12} Ф = 8,85\ пФ.$$

При 80% RH ($\varepsilon_r \approx 1.2$, враховуючи вплив вологи):

$$C_{80\%} = 8,85 \cdot 10^{-12} \cdot 1,2 \cdot \frac{0.001}{0.001} = 10,62 \cdot 10^{-12} Ф = 10,62\ пФ.$$

Діапазон зміни ємності: 8.85–10.62 пФ. Паразитна ємність доріжок (~20 пФ) додається до базової ємності, тому загальна ємність:

$$C_{total,\ 0\%} = 8,85 + 20 = 28,85\ пФ$$

$$C_{total,\ 80\%} = 10,\ 62 + 20 = 30,62\ пФ.$$

Розрахунок RC-фільтра для аналогової лінії

АЦП ESP32 чутливий до високочастотних шумів (наприклад, від Wi-Fi-модуля на 2.4 ГГц або DC-DC перетворювача на 1.2 МГц). Зміна вологості відбувається повільно (частота сигналу <1 Гц), тому RC-фільтр налаштований на відсікання шумів вище 10 Гц:

$$f_c = \frac{1}{2\pi \cdot R \cdot C}.$$

Вибираємо R = 10 кОм, щоб мінімізувати вплив на вимірювання, і розраховуємо ємність для f_c = 10 Гц:

$$C = \frac{1}{2\pi \cdot R \cdot f_c} = 1.59\ \mu Ф.$$

Вибираємо стандартне значення C = 1.5 μФ. Перераховуємо частоту зрізу:

$$f_c = \frac{1}{2\pi \cdot 10000 \cdot 1.5 \cdot 10^6} \approx \frac{1}{9.4248 \cdot 10^{-2}} \approx 10.6\ Гц.$$

Частота зрізу 10.6 Гц дозволяє пропускати повільні зміни вологості (<1 Гц), але відфільтровує високочастотні шуми (>10 Гц).

Калібрування та оцінка похибок

Калібрування проводиться при 20%, 50% і 80% RH за допомогою еталонного гігрометра. Похибка ±3–15% обумовлена:

- Нелінійністю АЦП ESP32 (±6 LSB, ~0.015V при 3.3V);
- Температурним дрейфом (0.5%);
- Неточністю геометрії пластин (±10% через ручне виготовлення);
- Шумами (компенсуються RC-фільтром і усередненням).

Для задач проєкту (точність ±2–5% RH) похибка до 15% є прийнятною, особливо для освітніх лабораторій і сільського господарства.

2.2.4. Давач освітленості на базі фоторезистора PDV-P8003

Давач освітленості, побудований на базі фоторезистора PDV-P8003, є важливим компонентом портативного пристрою моніторингу мікроклімату. Він призначений для вимірювання рівня освітленості в діапазоні 0–1000 люкс із похибкою ±5–20%. Давач підключений до GPIO32 мікроконтролера ESP32-

WROVER-I через дільник напруги, а для захисту від шумів додано RC-фільтр. Нижче наведено детальний опис роботи цього модуля з відповідними розрахунками.

Основні характеристики фоторезистора PDV-P8003

Фоторезистор PDV-P8003 змінює свій опір залежно від інтенсивності світла, що падає на нього. Основні параметри [9]:

- Діапазон опору: від 16–33 кОм при 10 люксах до <1 кОм при 1000 люксах;
- Час відгуку: ~20 мс (зростання), ~30 мс (спадання);
- Діапазон робочих температур: -30…+70°C;
- Максимальна напруга: 150VDC;
- Спектральна чутливість: максимум на 540 нм (видимий діапазон світла).

Давач підключений через дільник напруги до GPIO32, який налаштований як аналоговий вхід для АЦП ESP32. Зміна опору фоторезистора залежно від освітленості викликає зміну напруги на вході АЦП, що дозволяє визначити рівень освітленості після калібрування.

Схема підключення та принцип роботи

Фоторезистор PDV-P8003 підключений у складі дільника напруги з резистором $R_{divider}$ = 4.7 кОм, який з'єднаний між виводом GPIO32 і землею (рис. 2.6.).

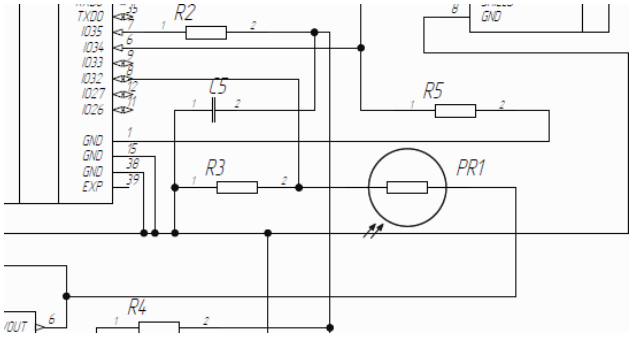


Рис. 2.6. Підключення давача освітленності (PR1)

Фоторезистор PDV-P8003 підключений у складі дільника напруги з резистором $R_{divider}$ = 4.7 кОм, який з'єднаний між виводом GPIO32 і землею. Напруга живлення V_{DD} = 3.3 В подається на фоторезистор, а вихідна напруга з дільника вимірюється через АЦП ESP32. Опір фоторезистора R_{photo} зменшується зі зростанням освітленості, що призводить до збільшення напруги на вході АЦП.

Принцип роботи:

- Фоторезистор змінює свій опір залежно від освітленості (чим більше світла, тим менший опір).
- Напруга на вході АЦП змінюється пропорційно до співвідношення опорів у дільнику напруги.
- ESP32 зчитує напругу через АЦП (12 біт, діапазон 0–3.3И) і перетворює її в цифровий сигнал.

- Після калібрування (з використанням еталонного джерела світла) значення напруги переводяться в одиниці освітленості (люкси).

Для захисту від високочастотних шумів між GPIO32 і землею додано RC-фільтр, який забезпечує стабільність вимірювань.

Розрахунок RC-фільтра для аналогової лінії

Освітленість змінюється повільно (частота сигналу <1 Гц), але АЦП ESP32 чутливий до високочастотних шумів, які можуть генеруватися Wi-Fi-

модулем (2.4 ГГц) або DC-DC перетворювачем MT3608 (1.2 МГц). Для захисту від шумів додано RC-фільтр між GPIO32 і землею.

Формула для частоти зрізу RC-фільтра:

$$f_c = \frac{1}{2\pi \cdot R \cdot C}.$$

Вибираємо частоту зрізу f_c = 10 Гц, щоб пропускати повільні зміни освітленості, але відфільтровувати високочастотні шуми. Задаємо R = 10 кОм, щоб мінімізувати вплив на дільник напруги, і розраховуємо ємність:

$$C = \frac{1}{2\pi \cdot 10000 \cdot 10} \approx \frac{1}{6,2832 \cdot 10:5} \approx 1,59 \cdot 10: -6\ Ф = 1,59\ \mu Ф.$$

Вибираємо стандартне значення C = 1.5 μФ. Перераховуємо частоту зрізу:

$$f_c = \frac{1}{2\pi \cdot 10000 \cdot 1.5 \cdot 10^{-6}} \approx \frac{1}{9.4248 \cdot 10^{-2}} \approx 10.6\ Гц.$$

Частота зрізу 10.6 Гц дозволяє пропускати повільні зміни освітленості (<1 Гц), але ефективно відфільтровує високочастотні шуми (>10 Гц). Вплив паразитної ємності доріжок (~20 пФ) додає еквівалентну ємність:

$$C_{eq} = 1.5\ \mu Ф + 20 \cdot 10 - 12\ Ф \approx 1.5\ \mu Ф.$$

Це не впливає на частоту зрізу, оскільки паразитна ємність значно менша.

Енергоспоживання давача

Фоторезистор є пасивним елементом і не споживає енергії, але вимірювання через АЦП потребує активності ESP32. Час зчитування (10 зразків, період дискретизації 10 мкс):

$$t_{read,\ ADC} = 10 \cdot\ 10 \cdot\ 10 - 6 = 0.1\ мс.$$

Струм АЦП ESP32 (~1 мА) додається до загального енергоспоживання, але через короткий час вплив мінімальний.

Калібрування та оцінка похибок

Калібрування проводилося при 10, 500 і 1000 люксах за допомогою еталонного люксметра. Похибка ±5–20% обумовлена:

- Нелінійністю АЦП ESP32 (±6 LSB, ~0.015V);
- Температурним дрейфом фоторезистора (до 22%);
- Неточністю дільника напруги (±5% через допуски резисторів);
- Шумами (компенсуються RC-фільтром і усередненням).

Для задач проєкту (точність ±10–20% lx) похибка є прийнятною, особливо для освітніх лабораторій і сільського господарства.

2.2.5. Система живлення

Система живлення портативного пристрою моніторингу мікроклімату забезпечує стабільне живлення для мікроконтролера ESP32-WROVER-I та давачів, дозволяючи пристрою працювати автономно протягом тривалого часу. Вона складається з акумулятора Li-Po (3.7В, 2000 мА·год), модуля заряду TP4056, DC-DC перетворювача MT3608 і лінійного стабілізатора AMS1117-3.3. Для фільтрації шумів від DC-DC перетворювача додано LC-фільтр, а також розв’язувальні конденсатори. Нижче наведено детальний опис роботи цього модуля з відповідними розрахунками.

Основні характеристики системи живлення

Система живлення розроблена для забезпечення стабільної напруги 3.3В для ESP32-WROVER-I та давачів, з урахуванням автономності.

Основні компоненти:

- Li-Po акумулятор: 3.7В, 2000 мА·год, забезпечує основне живлення.
- Модуль заряду TP4056: заряджає акумулятор від USB (5В).
- DC-DC перетворювач MT3608: підвищує напругу з 3.7В(акумулятор) до 5V.
- Лінійний стабілізатор AMS1117-3.3: знижує напругу з 5В до 3.3В для ESP32.
- LC-фільтр: згладжує шуми від DC-DC перетворювача.

Система працює в двох режимах: активному (ESP32 зчитує дані та передає їх через Wi-Fi) і глибокого сну (для мінімізації енергоспоживання).

Схема живлення та принцип роботи

Акумулятор Li-Po (3.7В, 2000 мА·год) є основним джерелом живлення. Його напруга подається на DC-DC перетворювач MT3608, який підвищує її до 5В. Ця напруга надходить на лінійний стабілізатор AMS1117-3.3, який забезпечує стабільні 3.3В для ESP32-WROVER-I та давачів. Модуль TP4056 заряджає акумулятор через USB (5В). Для захисту від шумів від MT3608 використовується LC-фільтр, а для стабільності живлення додано розв’язувальні конденсатори.

Принцип роботи:

- Акумулятор забезпечує базове живлення.
- MT3608 підвищує напругу до 5В, а AMS1117-3.3 стабілізує її до 3.3В.
- LC-фільтр і конденсатори згладжують шуми, забезпечуючи стабільне живлення.
- ESP32 періодично прокидається (кожні 5 хвилин), споживаючи більше енергії в активному режимі, і переходить у режим глибокого сну для економії заряду.

Розрахунок автономності

ESP32-WROVER-I має два основні режими роботи: активний (з Wi-Fi передачею) і глибокий сон. Енергоспоживання залежить від часу, проведеного в кожному режимі:

- Активний режим (Wi-Fi передача): ~100 мА, тривалість 10 с кожні 5 хвилин (300 с).
- Режим глибокого сну: ~10 мкА, тривалість 290 с кожні 5 хвилин.

Середнє споживання струму розраховується за формулою:

$$I_{avg} = \frac{I_{active} \cdot t_{active} + I_{sleep} \cdot t_{sleep}}{t_{total}} = \frac{100 \cdot 10 + 0,01(300 - 10)}{300} =$$

$$= \frac{1000 + 0,01 \cdot 290}{300} = \frac{1000 + 2,9}{300} \approx \frac{1002,9}{300} \approx 3,34\ мА.$$

Загальне середнє споживання:

$$I_{total,\ avg} \approx 3.34 + 0.0275 + 0.01 \approx 3.38\ мА.$$

Ємність акумулятора 2000 мА·год забезпечує автономність:

$$t_{autonomy} = \frac{\text{ємність акумулятора}}{I_{total,\ avg}} = \frac{2000}{3.38} \approx 592\ год \approx 24,7\ дні.$$

Розрахунок LC-фільтра для живлення

DC-DC перетворювач MT3608 працює на частоті ~1.2 МГц і генерує високочастотні шуми, які можуть впливати на стабільність живлення ESP32. Для їхньої фільтрації використовується LC-фільтр між виходом MT3608 (5V) і входом AMS1117-3.3.

Формула резонансної частоти LC-фільтра:

$$f_r = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}.$$

Потрібно відфільтрувати шуми вище 10 кГц, щоб захистити AMS1117 і ESP32 від низькочастотних пульсацій. Вибираємо L = 22 μH, і розраховуємо ємність:

$$C = \frac{1}{\left(2\pi \cdot f_r\right)^2 \cdot L} = \frac{1}{(2\pi \cdot 10000)^2 \cdot 22 \cdot 10^{-6}} \approx \frac{1}{\left(6,2832 \cdot 10^4\right)^2 \cdot 22 \cdot 10^{-6}} \approx$$

$$\approx \frac{1}{3,94 \cdot 10^9 \cdot 22 \cdot 10^{-6}} \approx \frac{1}{8,67 \cdot 10^4} \approx 11,5\ \mu Ф.$$

Вибираємо стандартне значення C = 10 μФ

Перераховуємо частоту зрізу:

$$f_r = \frac{1}{2\pi\sqrt{22 \cdot 10^{-6} \cdot 10 \cdot 10^{-6}}} \approx \frac{1}{2\pi\sqrt{22 \cdot 10^{-10}}} \approx \frac{1}{2\pi \cdot 1.48 \cdot 10^{-5}} \approx \frac{1}{9.3 \cdot 10^{-5}} \approx 10.7\ кГц.$$

Частота зрізу 10.7 кГц ефективно відфільтровує шуми від MT3608 (1.2 МГц), але пропускає низькочастотні складові. Додатково встановлюємо керамічний конденсатор 0.1 мкФ для високочастотних шумів (>1 МГц) і електролітичний 100 мкФ для низькочастотних пульсацій (<1 кГц).

Розрахунок ефективності DC-DC перетворювача та стабілізатора

DC-DC перетворювач MT3608: MT3608 має ККД ~85% при вхідній напрузі 3.7В і вихідній 5В. Вихідна потужність для ESP32 (у активному режимі, 3.3V, 100 мА):

$$P_{out,\ ESP32} = 3,3 \cdot 0,1 = 0,33\ Вт.$$

Вхідна потужність для AMS1117-3.3 (ККД ~65% при V_{in} = 5 В,V_{out} = 3.3 В):

$$P_{in,\ AMS1117} = \frac{P_{out,\ ESP32}}{0.65} = \frac{0.33}{0.65} \approx 0.51\ Вт.$$

Вхідна потужність для MT3608 (ККД ~85%):

$$P_{in,\ MT3608} = \frac{P_{in,\ AMS1117}}{0.85} = \frac{0.51}{0.85} \approx 0.6\ Вт.$$

Вхідний струм від акумулятора (3.7 В):

$$I_{in,\ battery} = \frac{P_{in,\ MT3608}}{V_{battery}} = \frac{0.6}{3.7} \approx 0.162\ А = 162\ мА.$$

Це значення враховується при оцінці загального енергоспоживання в активному режимі. Розсіювана потужність на AMS1117-3.3: Перепад напруги на стабілізаторі:

$$V_{drop} = 5 - 3,3 = 1,7B.$$

Розсіювана потужність при максимальному струмі 100 мА:

$$P_{diss} = V_{drop} \cdot I_{max} = 1,7 \cdot 0,1 = 0,17\ Bm.$$

Температурний нагрів (тепловий опір $R_{\theta JA} \approx 100$ °C/Вт):

$$\Delta T = P_{diss} - R_{\theta TA} = 0,17 \cdot 100 = 17℃.$$

При температурі навколишнього середовища 25°C температура стабілізатора складе ~42°C, що значно нижче максимального значення 125°C, тому додаткове охолодження не потрібне.

Висновки до розділу

Пристрій забезпечує надійний моніторинг температури (±0.5°C), вологості (±3–15% RH) і освітленості (±5–20% lx) з передачею даних через Wi-Fi. Автономність (~24.7 дня) відповідає вимогам для сільського господарства. RC- і LC-фільтри мінімізують шуми, а програмна обробка компенсує похибки давачів. Схема є не дорогою (загальна вартість <1000 UAH) і функціональною, з можливістю масштабування (додавання давачів, інтеграція з іншими платформами).

Розроблена та розрахована схема має блоки: живлення, збору даних, обробки даних, має такі характеристики: вимірювання в діапазоні 0…+50 °C, 20…80 % RH, з точністю вимірювань ±0,5 °C (температура), ±5–15 % (вологість), ±5–20 % (освітленість) та стабільну передачу даних через HTTP/MQTT. Отримані характеристики відповідають технічному завданню до диплому.

3. РОЗРОБКА ДРУКОВАНОГО ВУЗЛА

Друкований вузол — це друкована плата (ДП) з підключеними зовнішніми елементами, на якій виконано всі необхідні процеси обробки (паяння, покриття тощо).

3.1. Вибір та обґрунтування типу друкованої плати

Згідно з ДСТУ 2646-94, розрізняють односторонні (ОДП), двосторонні (ДДП) та багатошарові (БДП) друковані плати, які можуть бути виконані на жорсткій або гнучкій основі. Для вибору типу ДП розглянемо їх характеристики:

- ОДП: Прості у виготовленні, дозволяють встановлювати навісні елементи з одного боку без додаткової ізоляції. Недоліки: низька щільність монтажу, обмежена механічна міцність. Застосовуються в простих побутових пристроях.
- ДДП: Забезпечують високу щільність монтажу, міцність кріплення елементів і ефективне використання поверхні. Недоліки: вища вартість і складність виготовлення. Використовуються в системах керування та вимірювальній техніці.
- БДП: Мають найвищу щільність монтажу, стійкість до механічних і кліматичних впливів, але складні у виготовленні та ремонті.

Для системи моніторингу, що включає мікроконтролер ESP32-WROVER-I, давачи (DS18B20, ємнісний давач вологості, фоторезистор) та Wi-Fi модуль, обрано двосторонню друковану плату (ДДП). Це рішення забезпечує достатню щільність монтажу для розміщення всіх компонентів (38-контактний ESP32, давачи, роз’єм USB-C, LC-фільтри) при розумній вартості. ОДП не підходить через більші габарити, а БДП є надлишковою через відсутність потреби в складних багатошарових з’єднаннях.

3.2. Вибір та обґрунтування матеріалу друкованої плати

Відповідно до ГОСТ 10316-76, для виготовлення ДП використовують фольговані діелектрики, такі як гетинакс (електроізоляційний папір, просочений фенольною смолою) або склотекстоліт (склотканина, просочена епоксидною смолою). Склотекстоліт переважає гетинакс за електромеханічними характеристиками: вища міцність, термостійкість (до 260°C), низька водопроникність (0.2–0.8%) і поверхневий опір (10^4 МОм).

Для системи обрано склотекстоліт марки FR-4 з товщиною мідної фольги 35 мкм і товщиною основи 1.5 мм. Обґрунтування:

- FR-4 має високий клас вогнестійкості (94V-0) і відповідає вимогам безпеки.
- Товщина фольги 35 мкм достатня для струмів до 100 мА, характерних для малопотужної системи (ESP32, давачи, TP4056).
- Товщина основи 1.5 мм забезпечує механічну міцність для компонентів у корпусах SMD і QFN.

3.3. Вибір та обґрунтування форми та розміру друкованої плати

Для компактного розміщення компонентів (ESP32-WROVER-I, давачі, роз’єм USB-C, котушка індуктивності L1) обрано прямокутну форму ДП. Згідно з ГОСТ 10317-79, розміри сторін повинні бути кратними 2.5 мм (для довжини до 100 мм) або 5 мм (до 350 мм), а співвідношення сторін — не більше 1:3.3 урахуванням розміщення всіх компонентів (мікроконтролер, давачі, роз’єм X1, конденсатори, резистори) і забезпечення простору для трасування, розміри ДП становлять 100 × 60 мм. Ці розміри відповідають ГОСТ, забезпечують компактність і зручність монтажу в корпусі системи.

3.4. Вибір та обґрунтування класу точності

Згідно з ГОСТ 23751-86, класи точності ДП визначають мінімальну ширину провідників і просвітів. Для системи з мікроконтролером

ESP32-WROVER-I у корпусі QFN (38 виводів) і SMD-компонентами (резистори, конденсатори, давачі) необхідний крок координатної сітки 0.2 мм. Це відповідає четвертому класу точності, який забезпечує:

- Мінімальну ширину провідника: 0.15 мм.
- Мінімальний просвіт між провідниками: 0.15 мм.
- Точність позиціонування отворів і контактних майданчиків: ±0.07 мм.

Цей клас дозволяє розмістити всі компоненти, включаючи дрібні SMD-елементи, без надмірного ускладнення виробництва.

3.5. Конструкторсько-технологічний розрахунок друкованої плати

Розрахунок ширини друкованих провідників

Ширина провідника визначається за формулою:

$$b = max(b_{ГОСТ}, b_I, b_U),$$

де:

- $b_{ГОСТ}$ = 0.15 мм— мінімальна ширина за четвертим класом точності.
- b_I — ширина за максимальним струмом.
- b_U — ширина з урахуванням падіння напруги.

Розрахунок

$$b_I = \frac{I_{max}}{j \cdot t} = \frac{0,1}{50 \cdot 0,035} = 0,057 \text{ мм},$$

де:

- I_{max} = 100 мА— максимальний струм (споживання ESP32 у активному режимі з Wi-Fi).

- j = 50 А/мм^2 — допустима густина струму для фольги 35 мкм (комбінований позитивний метод).
- t = 0.035 мм — товщина фольги.

$$b_U = \frac{\rho \cdot I \cdot I_{max}}{\Delta U \cdot t} = \frac{0{,}0175 \cdot 10^{-6} \cdot 0{,}1 \cdot 0{,}1}{0{,}165 \cdot 0{,}035} = 0{,}03 \text{ мм},$$

де:

- ρ = 0.0175 μОм· м— питомий опір міді.
- l = 0.1 м — довжина найдовшого провідника.
- ΔU = 0.165 В — допустиме падіння напруги (5% від 3.3 В).
- t = 0.035 мм.

Розрахунок діаметру монтажного отвору

Для SMD-компонентів отвори використовуються для роз'єму USB-C (X1). Мінімальний діаметр отвору:

$$d = d_в + 2r + \Delta = 0,6 + 2 \cdot 0,15 + 0,1 = 1 \text{ мм},$$

де:

- $d_в$ = 0.6 мм — діаметр виводу роз'єму.
- r = 0.15 мм— просвіт між виводом і стінками.
- Δ = 0.1 мм— граничне відхилення.

Максимальний діаметр отвору:

$$dmax = d + \delta = 1.0 + 0.05 = 1.05 \text{ мм},$$

де

δ = 0.05 мм— допуск.

Розрахунок діаметру контактних майданчиків

Мінімальний ефективний діаметр контактного майданчика:

$$D_{еф} = d_{max} + 2b_п + 2\Delta_о + 2\Delta_п =$$
$$= 1,05 + 2 \cdot 0,2 + 2 \cdot 0,07 + 2 \cdot 0,15 = 1,84 \text{ мм},$$

де:

- d_{max} = 1.05 мм.

- $b_п$ = 0.2 мм— ширина пояска майданчика.
- $Δ_о$ = 0.07 мм — похибка позиціонування отвору.
- $Δ_п$ = 0.15 мм — похибка позиціонування майданчика.

Мінімальний діаметр майданчика:

$$D_{мін} = D_{еф} + 2t = 1.84 + 2 \cdot 0.035 = 1.91\,мм.$$

Максимальний діаметр приймаємо 2.0 мм для зручності трасування.

Розрахунок мінімальних просвітів

Мінімальна відстань між провідником і контактним майданчиком:

$$a_{пк} = a_{ц} + Δ_{п} + Δ_{пр} = 0,5 + 0,05 + 0,08 = 0,63\,мм.$$

де:

- $a_ц$ = 0.5 мм — відстань між центрами.
- $Δ_п$ = 0.05 мм — похибка розміщення майданчика.
- $Δ_{пр}$ = 0.08 мм — зсув провідника.

Приймаємо просвіти: між провідником і майданчиком — 0.7 мм, між провідниками — 0.2 мм, між майданчиками — 0.7 мм.

3.6. Електричний розрахунок друкованої плати

Падіння напруги на найдовшому провіднику

$$\Delta U = \rho \cdot \frac{l \cdot I_{max}}{b \cdot t} = \frac{0,0175 \cdot 10^{-6} \cdot 0, \frac{0,1}{0,1}}{0,2 \cdot 0,035} = 0,025B,$$

де:

- ρ = 0.0175 μОм · м.
- l = 0.1 м.
- I_{max} = 0.1 А.
- b = 0.2 мм.
- t = 0.035 мм.

3.7. Розрахунок надійності друкованого вузла

Основні показники надійності:

- (P(t)) — ймовірність безвідмовної роботи.
- Q(t) = 1 - P(t) — ймовірність відмови.
- λ — інтенсивність відмов.
- $T_н$ — середній час напрацювання на відмову

Інтенсивність відмов компонентів (на основі даних виробників):

- ESP32-WROVER-I:

$\lambda = 5 \cdot 10^{-6} \cdot 1/год$

- TP4056:

$\lambda = 3 \cdot 10^{-6} \cdot 1/год.$

- DS18B20:

$\lambda = 2 \cdot 10^{-6} \cdot 1/год.$

- Фоторезистор PDV-P9003-16:

$\lambda = 1 \cdot 10^{-6} \cdot 1/год.$

- Ємнісний давач вологості:

$\lambda = 2 \cdot 10^{-6} \cdot 1/год.$

- Пасивні компоненти (резистори, конденсатори):

$\lambda = 0.5 \cdot 10^{-6} \cdot 1/год(\ 10шт.)\ .$

Коефіцієнт навантаження для резисторів:

$$K_H = \sqrt{\frac{P_{роб}}{P_{ном}}} = \sqrt{\frac{0{,}01}{0{,}25}} = 0{,}2,$$

де

$P_{роб} = 0.01\ Вт,\ P_{ном} = 0.25\ Вт:$

3.8. Розрахунок віброміцності друкованого вузла

Плата розміром 100 · 60 ·1.5 мм, сумарна маса компонентів $m_к$ = 10 г, частота вібрацій f = 60 Гц, коефіцієнт перенавантаження n = 8.

Параметри FR-4:

- Модуль Юнга:

$E = 3.2 \cdot 10^{10} Па$.

- Коефіцієнт Пуассона:

$\mu = 0.22$.

- Питома густина:

$\rho = 2050\ кг/м^3$.

- Показник згасання:

$\varepsilon = 0.06$.

Маса плати:

$$m_п = \varrho \cdot V = 2050 \cdot (0.1 \cdot 0.06 \cdot 0.0015) = 0.01845\ кг = 18.45\ г.$$

Загальна маса:

$$m = m_п + m_к = 18.45 + 10 = 28.45\ г.$$

Циліндрична жорсткість:

$$D = \frac{E \cdot h^3}{12 \cdot (1 - \mu^2)} = \frac{3{,}2 \cdot 10^{10} \cdot 0{,}0015^3}{12 \cdot (1 - 0{,}22^2)} = 0{,}85\ Н \cdot м \cdot$$

3.9. Проектування друкованої плати

Для проектування друкованої плати використовувалось програмне забезпечення Altium Designer,студентська версія (рис. 3.1). Спочатку була розроблена принуипова схема описана у розділі 2 та додана у додатку Б. На базі цієї схеми програмними інструментами середовища Altium додано основні елементи схеми і далі виконано розведення плати.

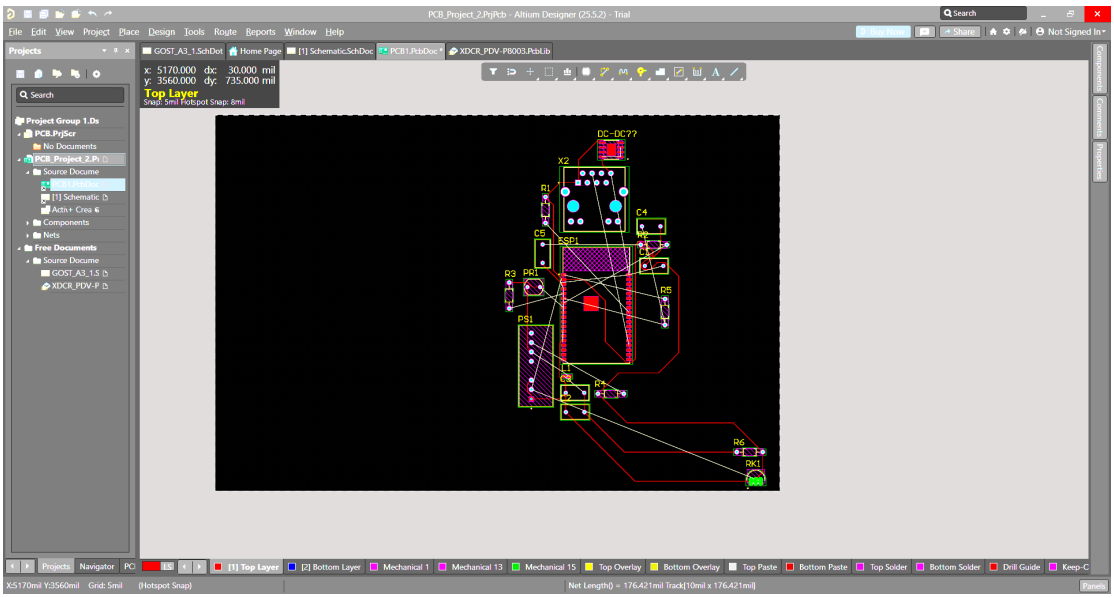


Рис.3.1 Проектування у Altium Designer

Висновки до розділу

У розділі виконано:

- Вибір ДДП на основі склотекстоліту FR-4 (товщина фольги 35 мкм, основи 1.5 мм).
- Визначено розміри плати 100 × 60 мм, четвертий клас точності.
- Розраховано ширину провідників (0.2 мм), діаметр отворів (1.0 мм), контактних майданчиків (2.0 мм), просвіти (0.2–0.7 мм).
- Електричний розрахунок підтвердив падіння напруги (0.025 В) нижче 5% (0.165 В).

Розроблений друкований вузол відповідає вимогам енергоефективності, завадостійкості та масштабованості системи моніторингу параметрів навколишнього середовища.

4. ПРОГРАМНЕ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ

4.1. Вимоги до програмного забезпечення

Програмне забезпечення портативного пристрою моніторингу мікроклімату розроблено для виконання ключових функцій, що забезпечують ефективну роботу системи. Воно автоматично зчитує дані про температуру, вологість і освітленість кожні 10 секунд, виконує цифрову фільтрацію та калібрування для підвищення точності вимірювань, передає дані через Wi-Fi за протоколами HTTP/MQTT, зберігає до 100 записів у локальному буфері та підтримує віддалене керування через веб-інтерфейс. Для енергоефективності передбачено режим глибокого сну зі споживанням менше 10 мкА, що забезпечує автономність до 1,5 місяця, а також адаптивну частоту передачі даних залежно від змін параметрів. Надійність досягається завдяки автоматичному відновленню Wi-Fi-з'єднання, watchdog-захисту від зависань, віддаленому оновленню прошивки (OTA) та шифруванню даних. Система інтегрується з Home Assistant, підтримує стандартні IoT-протоколи та дозволяє масштабування до мережі давачів.

4.2. Алгоритм роботи програмного забезпечення

Програмне забезпечення системи моніторингу мікроклімату працює за циклічним принципом з акцентом на енергоефективність і стабільність (рис. 4.1.).

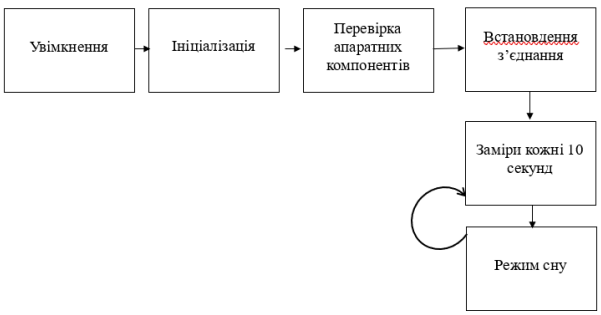


Рис. 4.1 Блок-схема алгоритму

На початку роботи пристрій ініціалізує конфігураційні параметри, збережені в енергонезалежній пам’яті, налаштовує периферійні модулі, такі як Wi-Fi, давачі та таймери, перевіряє працездатність давачів і підключається до Wi-Fi-мережі або створює резервну точку доступу. У основному циклі система періодично виходить із режиму глибокого сну, зчитує дані з давачів температури, вологості та освітленості, обробляє їх за допомогою цифрової фільтрації, перевіряє на відповідність граничним значенням і передає через Wi-Fi до центрального сервера. У разі втрати зв’язку дані зберігаються локально в буфері, а після відновлення з’єднання передаються на сервер. Пристрій повертається в режим глибокого сну на 7–8 секунд для економії енергії. У разі помилок, таких як втрата Wi-Fi-сигналу чи збій давачів, система автоматично перепідключається або генерує діагностичні повідомлення. Watchdog-механізм забезпечує перезавантаження при критичних збоях.

Для зчитування даних із давача температури DS18B20 програмне забезпечення надсилає команду конвертації через шину 1-Wire, чекає 750 мс, зчитує 16-бітне значення, перевіряє цілісність за допомогою CRC і конвертує дані в температуру з роздільністю ±0,0625 °C. Аналогові давачі вологості та освітленості обробляються через 12-бітний АЦП мікроконтролера. Сирі значення (0–4095) накопичуються в циркулярному буфері з семи вимірів, до яких застосовується медіанний фільтр для усунення шумів. Кожне четверте значення лінійно калібрується для перетворення у фізичні одиниці (0–100 %) і обмежується допустимим діапазоном, що зменшує обчислювальне навантаження.

Енергоефективність забезпечується оптимізацією робочого циклу. Активна фаза триває 2–3 секунди, решту часу (7–8 секунд) пристрій перебуває в режимі глибокого сну. Частота передачі даних адаптується до змін параметрів: при стабільних показниках (зміна <5 %) передача відбувається кожні п’ять циклів, при помірних змінах (5–15 %) — кожні два цикли, при значних (>15 %) — що циклу. Wi-Fi-модуль вимикається в режимі сну, тактова

частота процесора знижується, а пробудження здійснюється через RTC-таймер.

Пристрій підключається до Wi-Fi-мережі протягом 30 секунд, використовуючи збережені параметри, або активує резервну точку доступу при невдачі. Дані формуються в JSON-пакети з міткою часу, шифруються за протоколом Noise і передаються через HTTP POST-запити. У разі втрати зв’язку до 100 записів зберігаються локально, передаються після відновлення з’єднання, а найстаріші записи видаляються при переповненні буфера.

На старті система тестує давачі, Wi-Fi-модуль і конфігурації, генеруючи звіт про стан. Під час роботи відстежується якість Wi-Fi-сигналу (RSSI), рівень заряду батареї, статистика передачі даних і помилки давачів. Програмний watchdog з інтервалом 8 секунд перезавантажує систему при зависанні, зберігаючи лог помилки в енергонезалежній пам’яті.

Програмне забезпечення має модульну структуру, що включає рівень апаратної абстракції (драйвери давачів, мережевий стек, управління живленням), рівень логіки обробки (збір і фільтрація даних, керування енергоспоживанням, мережеві з’єднання, діагностика) та рівень інтеграції (API, протоколи HTTP/MQTT, конфігурація та оновлення).

Для реалізації алгоритмів використано ESPHome, яка забезпечує декларативний підхід через YAML-конфігурації, автоматичну генерацію оптимізованого C++-коду, вбудовані алгоритми фільтрації, нативну інтеграцію з Home Assistant, шифрування Noise, OTA-оновлення, віддалену діагностику та веб-інтерфейс для налаштувань.

Home Assistant забезпечує інтерфейс користувача з дашбордами реального часу, графіками трендів, кольоровими індикаторами, історичними звітами, налаштуванням граничних значень, push- і email-сповіщеннями. Мобільний додаток для iOS та Android підтримує віджети та хмарну синхронізацію.

Дані шифруються за стандартом AES-256, з’єднання аутентифікуються

через API-ключі, а захист від replay-атак реалізовано через мітки часу. Система підтримує автоматичне відновлення з’єднань, буферизацію даних і резервне копіювання конфігурацій для відмовостійкості.

Висновки

Розроблене програмне забезпечення ефективно реалізує функції збору, обробки та передачі даних мікроклімату, забезпечуючи енергоефективність і надійність. Платформа ESPHome спрощує впровадження складних алгоритмів, а інтеграція з Home Assistant надає професійний інтерфейс. Модульна архітектура дозволяє адаптувати систему до різних сценаріїв і масштабувати до мережі давачів. Комплексний підхід до безпеки та діагностики забезпечує стабільну автономну роботу в польових умовах.

ВИСНОВКИ

У дипломному проєкті створено систему моніторингу параметрів навколишнього середовища на основі мікроконтролера ESP32-WROVER-I, що забезпечує вимірювання температури в діапазоні -55…+125 °C, вологості 20–80 % та освітленості 0–1000 люкс із бездротовою передачею даних через Wi-Fi. Система відповідає сучасним вимогам до енергоефективності, надійності, економічної доступності та масштабованості.

У розділі 1 проведено огляд промислових систем моніторингу, які вирізняються високою точністю (±0.1–0.5 °C, ±0.8–2 %), але мають високу вартість (400–1450 дол. США) та обмеження у функціональності, зокрема відсутність вимірювання освітленості чи бездротових можливостей у деяких моделей. Запропонована система забезпечує достатню точність (±0.5 °C, ±3–15 %, ±5–20 % люкс) при значно нижчій вартості (2500–3500 грн), вимірює додатковий параметр – освітленість, та підтримує автономну роботу протягом 1–2 місяців на акумуляторі 2000 мА·год. Обґрунтовано вибір ESP32-WROVER-I над STM32F103C8T6 завдяки вбудованим Wi-Fi та Bluetooth, більшій обчислювальній потужності (двоядерний процесор, 240 МГц) та підтримці Arduino, MicroPython і ESPHome.

У другому розділі розроблено апаратне забезпечення системи, включаючи принципову електричну схему з мікроконтролером ESP32-WROVER-I, датчиками DS18B20 (температура), ємнісним сенсором вологості та фоторезистором PDV-P9003-16 (освітленість). Система електроживлення на базі мікросхеми TP4056 забезпечує зарядку акумулятора і стабільну напругу 3,3 В, а захисні елементи (конденсатори, резистори, LC-фільтри) гарантують завадостійкість. Проведено розрахунки електричних параметрів, що підтверджують падіння напруги 0.025 В (менше 0.165 В) і надійність роботи.

У розділі 3 розроблено конструкцію друкованого вузла, обґрунтовано вибір двосторонньої друкованої плати зі склотекстоліту FR-4 розміром 100×60 мм, товщиною фольги 35 мкм, основи 1.5 мм та четвертим класом точності.

Проведено розрахунки ширини провідників (0.2 мм), діаметра отворів (1.0 мм), контактних майданчиків (2.0 мм) та просвітів (0.2–0.7 мм), що забезпечують завадостійкість та енергоефективність. Вібромiцність (пункт 3.8) підтверджена прогином 0.57 мм, що не перевищує 1 мм, а тепловий режим (підрозділ 3.9) відповідає вимогам, оскільки температура кристалу ESP32 становить 54.85 °C при максимальному порозі 125 °C.

У розділі 4 розроблено програмне забезпечення на платформі ESPHome, яке реалізує циклічний алгоритм зчитування даних з давачів DS18B20,

ємнісного сенсора вологості та фоторезистора PDV-P9003-16 з інтервалом 10 секунд, їх цифрову фільтрацію, передачу через HTTP/MQTT та локальне збереження до 100 записів. Програмне забезпечення підтримує режими глибокого сну, автоматичне відновлення Wi-Fi-з'єднання, watchdog-захист, шифрування AES-256 та інтеграцію з Home Assistant для відображення даних у реальному часі через веб-інтерфейс чи мобільний додаток. Вибір ESPHome над Arduino IDE та MicroPython обґрунтовано швидкістю розробки (2–3 тижні), автоматичною оптимізацією енергоефективності та вбудованими механізмами надійності.

Рекомендується вдосконалити програмне забезпечення системи шляхом розробки власного мобільного додатка для iOS та Android, який забезпечить зручну конфігурацію, моніторинг у реальному часі, push-сповіщення та історичний аналіз даних без залежності від Home Assistant. Планується реалізувати додаток із підтримкою офлайн-режиму, інтуїтивним інтерфейсом та функцією віддаленого оновлення прошивки (OTA) для спрощення обслуговування. Для підвищення енергоефективності пропонується впровадити адаптивний алгоритм передачі даних, який динамічно змінюватиме інтервал відправлення залежно від змін параметрів, що може подовжити автономність до 2–3 місяців.

Розроблена система має значний потенціал для використання в аграрному секторі, розумних будинках. Її низька собівартість, модульна

архітектура, підтримка IoT-протоколів дозволяють масштабувати рішення від одиничного пристрою до розподіленої мережі, сприяючи впровадженню технологій розумного контролю мікроклімату в Україні та за її межами.

ПЕРЕЛІК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Ковальчук, А. В., & Семенов, С. Г. (2023). Проектування та оптимізація друкованих плат для IoT пристроїв. Наукові праці Вінницького національного технічного університету, 1(35), 67–74. URL: https://praci.vntu.edu.ua/index.php/praci/article/view/789

2. Захарчук, В. М., & Городецький, І. В. (2021). Маловольтні бездротові сенсорні системи для екологічних застосувань. Вісник Тернопільського національного технічного університету, 2(102), 89–97. URL: https://visnyk.tntu.edu.ua/index.php/visnyk/article/view/765

3. Глімбовський, Б. В. (2024). Розробка та виготовлення метеостанції на базі модуля ESP32 та Arduino Micro Pro з бездротовим зв'язком та підтримкою ОС Windows та Android. Хмельницький політехнічний коледж Національного університету «Львівська політехніка». URL: https://ppt-online.org/606489

4. Національний інститут стратегічних досліджень. (2023). Створення ефективної системи моніторингу довкілля в Україні: проблеми і шляхи їх вирішення. Аналітична записка. URL: https://niss.gov.ua/doslidzhennya/nacionalna-bezpeka/stvorennya-efektivnoi-sistemi-monitoringu-dovkillya-v-ukraini

5. Міністерство захисту довкілля та природних ресурсів України. (2024). Екологічний моніторинг довкілля: державна політика та координація. URL: https://mepr.gov.ua/diyalnist/napryamky/ekologichnyj-monitoryng/ekologichnyj-monitoryng-dovkillya/

6. Ouni, R., & Saleem, K. (2022). Sustainable Wireless Sensor Network Based Environmental Monitoring. Encyclopedia MDPI, 2(3), 1865–1883. URL: https://encyclopedia.pub/entry/25438

7. Adu-Manu, K. S., et al. (2022). WSN Architectures for Environmental Monitoring Applications. Journal of Sensors, 2022, Article ID 7823481. URL: https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1155/2022/7823481

8. Zhang, L., et al. (2024). Designing a low-cost wireless sensor network for particulate matter monitoring: Implementation, calibration, and field-test. Measurement, 236, 115074. URL: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1309104224001739

9. Kumar, A., & Singh, R. (2025). Implementation of a wireless sensor network for irrigation management in drip irrigation systems. Scientific Reports, 15, 1247. URL: https://www.nature.com/articles/s41598-025-97303-w

10. Thompson, M. J., et al. (2024). An investigation on real-time insights: enhancing process control with IoT-enabled sensor networks. Discover Internet of Things, 5, 89. URL: https://link.springer.com/article/10.1007/s43926-025-00124-6

11. Chen, W., & Liu, H. (2022). Advancement of Environmental Monitoring System Using IoT and Sensor: A Comprehensive Analysis. AIMS Environmental Science, 9(6), 761–785. URL: https://www.aimspress.com/article/doi/10.3934/environsci.2022044

12. Vaisala HMT120 Humidity and Temperature Transmitter: Technical Data. Vaisala, 2023. URL: https://www.vaisala.com/sites/default/files/documents/HMT120-Datasheet-B211243EN.pdf

13. Testo 160 TH WiFi Data Logger: Technical Data. Testo, 2024. URL: https://www.testo.com/en-US/testo-160-th/p/0572-2021

14. Rotronic HygroPalm HP23 Handheld Instrument: Technical Datasheet. Rotronic, 2024. URL: https://www.rotronic.com/media/productattachments/HP23_Datasheet.pdf

15. BME280 Combined Humidity and Pressure Sensor: Datasheet. Bosch Sensortec, 2023. URL: https://www.bosch-sensortec.com/media/boschsensortec/downloads/datasheets/bst-bme280-ds002.pdf

16. ESPHome Documentation: Configuration and Integration Guide. ESPHome, 2024. URL: https://esphome.io/guides/configuration-types.html

17. DHT11 Temperature and Humidity Sensor: Datasheet. Aosong Electronics, 2022. URL: https://www.aosong.com/en/products-32.html

18. MT3608 DC-DC Step-Up Converter: Datasheet. Aerosemi, 2022. URL: https://www.aerosemi.com/pdf/MT3608.pdf

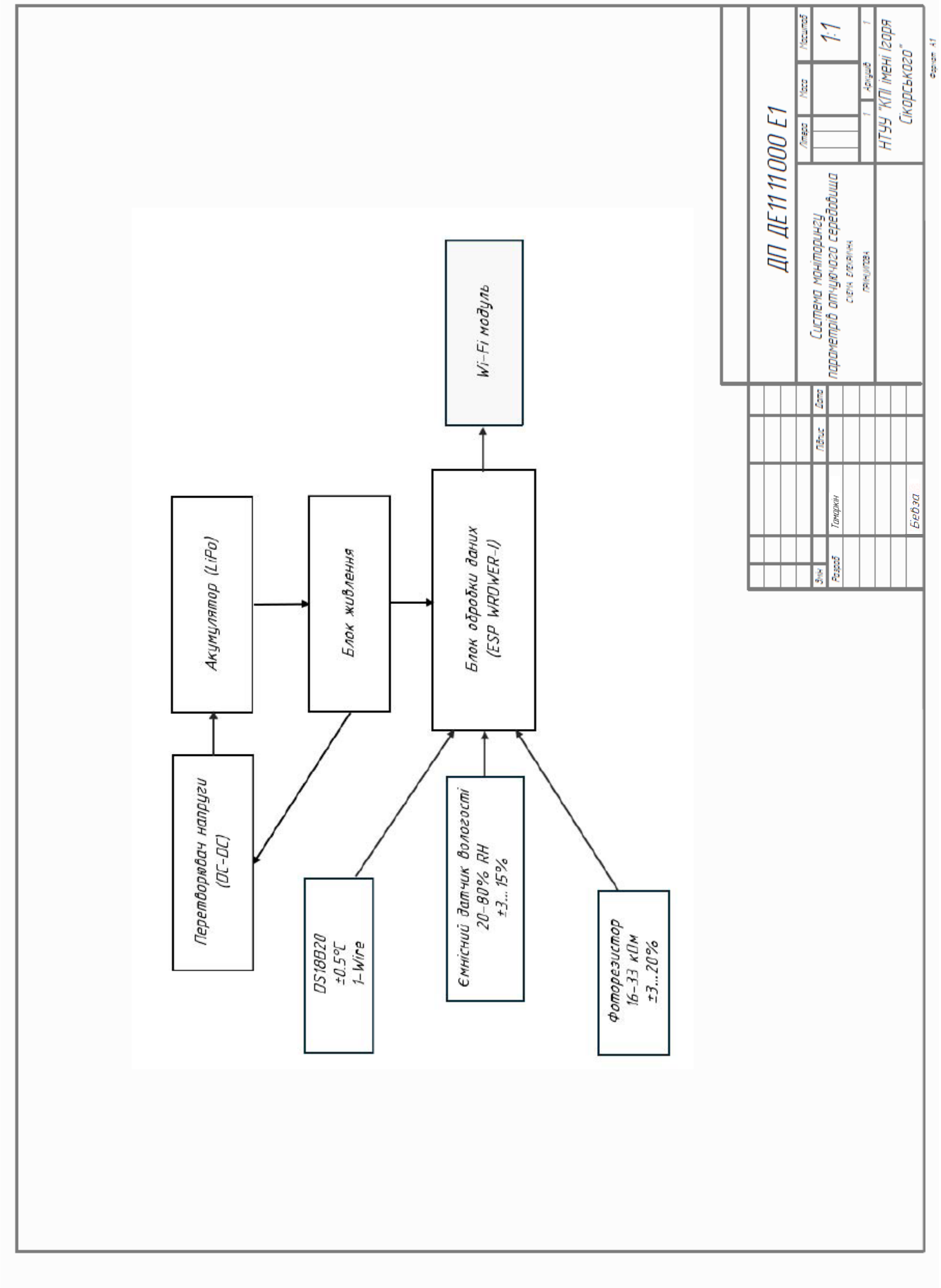
19. TP4056 Lithium Battery Charger: Datasheet. NanJing Top Power ASIC Corp, 2023. URL: https://www.toppowerasic.com/pdf/TP4056.pdf

20. DS18B20 Programmable Resolution 1-Wire Digital Thermometer: Datasheet. Maxim Integrated, 2022. URL: https://www.analog.com/en/products/ds18b20.html

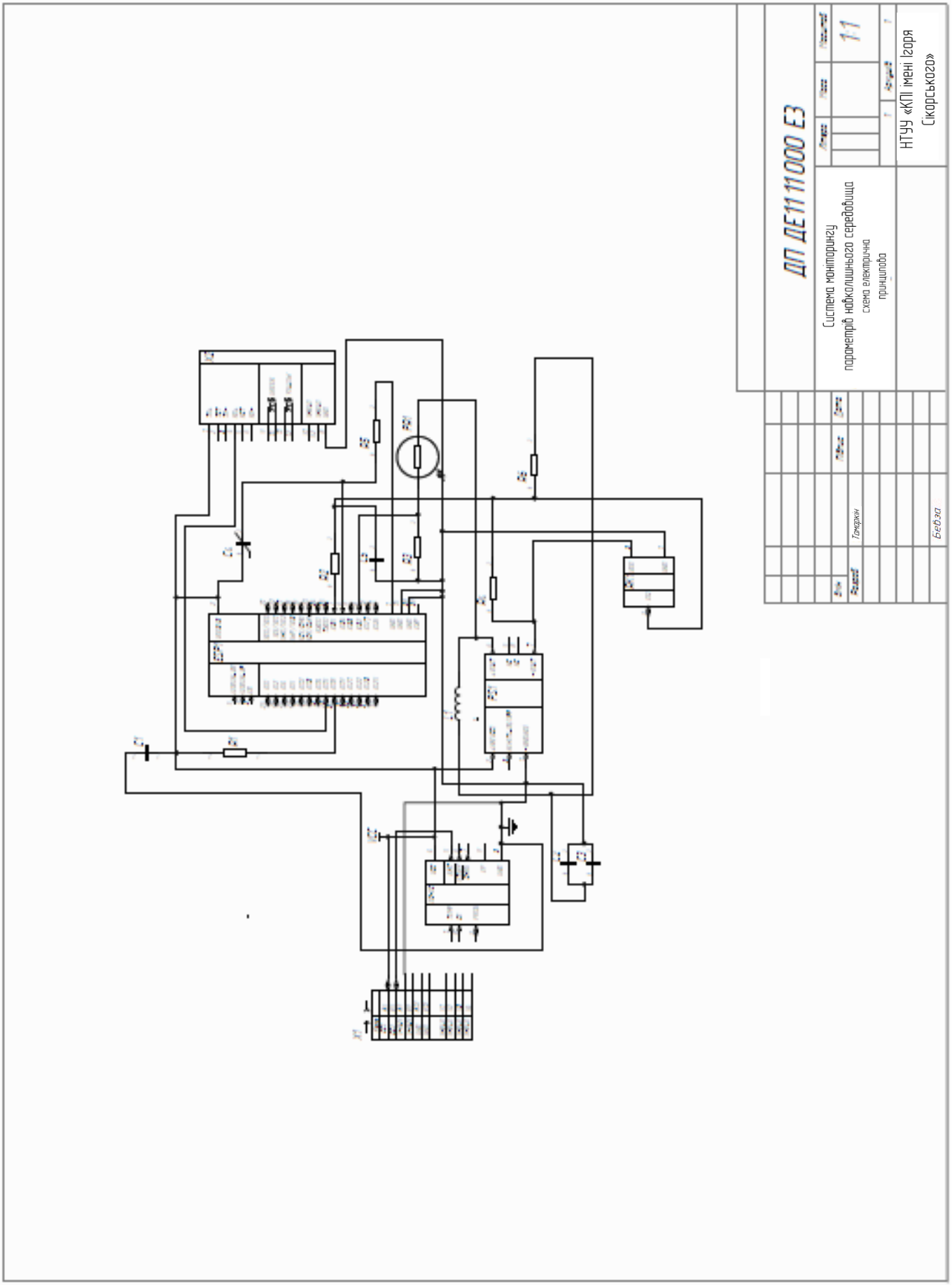
21. PDV-P8003 Photoresistor Datasheet. Advanced Photonix, 2022. URL: https://www.advancedphotonix.com/wp-content/uploads/2022/03/PDV-P8003-Datasheet.pdf

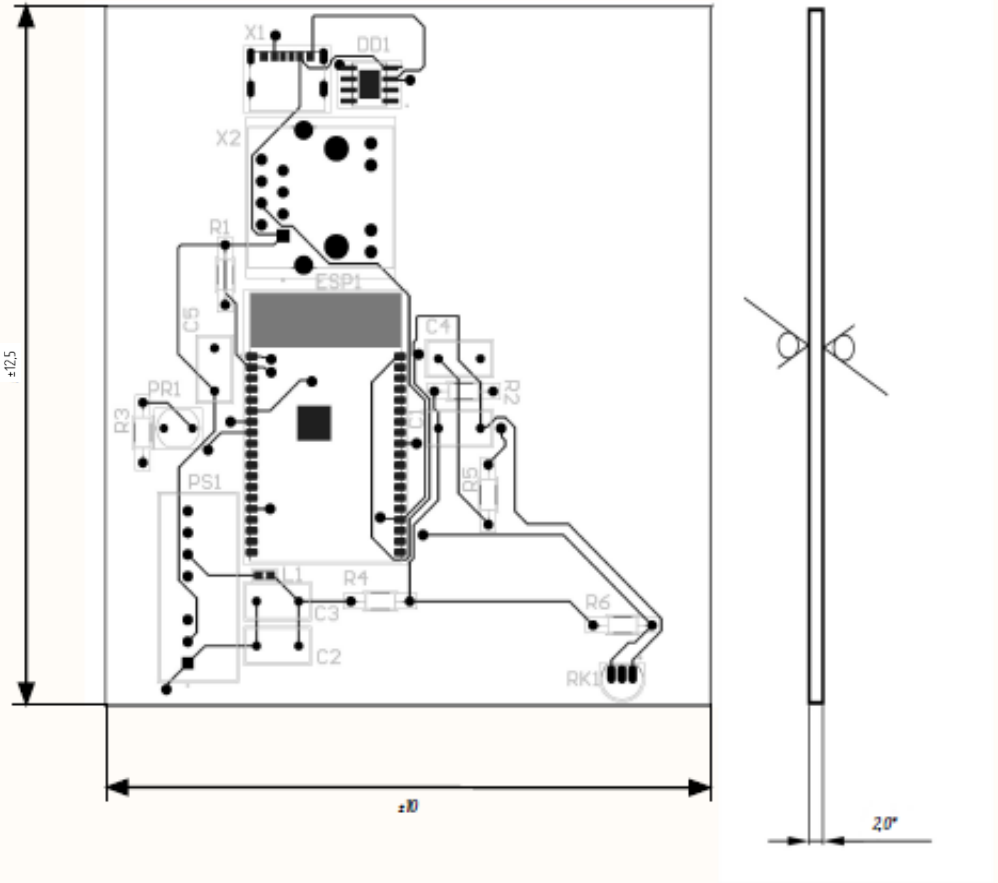
22. Rotronic HW4 Software: Technical Overview. Rotronic, 2023. URL: https://www.rotronic.com/en/humidity-measurement/hw4-software

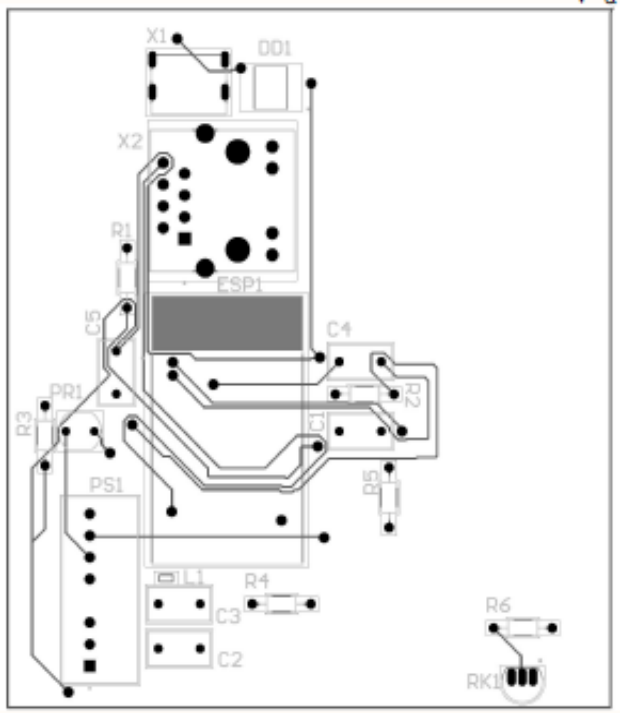
ДОДАТОК А


Wi-Fi модуль
Акумулятор (LiPo)
Блок живлення
Блок обробки даних (ESP WROWER-I)
Перетворювач напруги (DC-DC)
DS18B20 ±0.5°C 1-Wire
Ємнісний датчик вологості 20-80% RH ±3...15%
Фоторезистор 16-33 кОм ±3...20%
ДП ДЕ111000 Е1
Система моніторингу параметрів атмосферного середовища
НТУУ "КПІ імені Ігоря Сікорського"
Розроб.
Перевір.
Н.контр.
Затв.
Бєлов Э.Г.

ДОДАТОК Б


ДП ДЕ111000 Е3
Система моніторингу
параметрів навколишнього середовища
схема електрична
принципова
НТУУ «КПІ імені Ігоря
Сікорського»
11





1. *Розміри для довідок
2. Плату виготовити електро хімічним методом
3. Клас точності плати 4 за ГОСТ 23751-86
4. Інші технічні вимоги за ОСТ4 ГО.010.070.014

Змін.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	ДП ДЕ11.11.000		
Розроб.		Тимаркін			Друкована плата «Система моніторингу параметрів оточуючого середовища»	Літера	Маса	Масштаб
Перев.								1:1
Т.контр.						Арк. 1	Аркушів	
Н.контр.					НТУУ «КПІ імені Ігоря Сікорського»			
Затв.		Бевзо						

ДОДАТОК В

Додаток Г

ЛІСТИНГ ПРОГРАМИ

Код конфігурації

```
esphome:
  name: envmonitor

esp32:
  board: esp32dev
  framework:
    type: arduino

external_components:
  - source:
      type: git
      url: https://github.com/esphome/esphome
      ref: 2024.4.0
    components: [ dallas ]

wifi:
  ssid: "YourWiFiSSID"
  password: "YourWiFiPassword"
  ap:
    ssid: "EnvMonitor Fallback"
    password: "fallbackpass"

captive_portal:

logger:

api:

ota:
  platform: esphome

time:
  - platform: homeassistant
    id: esptime

# -----------------------------------
# DS18B20 через dallas
```

```
# -------------------------------------
dallas:
  - pin: GPIO15
    update_interval: 10s
    id: dallas_bus

sensor:
  # Температура
  - platform: dallas
    address: 0x3C0000031EDD2B28
    name: "Температура"
    id: air_temp
    resolution: 12
    dallas_id: dallas_bus

  # Вологість
  - platform: adc
    pin: GPIO34
    name: "Вологість"
    id: soil_moisture_raw
    attenuation: 12db
    update_interval: 10s
    filters:
      - median:
          window_size: 7
          send_every: 4
          send_first_at: 1
      - calibrate_linear:
          - 0.5 -> 100.0
          - 3.0 -> 0.0
      - lambda: |-
          return std::min(x, 1.0f);
    unit_of_measurement: "%"
    icon: "mdi:water-percent"

  # Освітленість
  - platform: adc
    pin: GPIO35
    name: "Освітленість"
    id: light_level
    attenuation: 12db
    update_interval: 10s
    filters:
```

```
  - lambda: |-
      return x * 100;
unit_of_measurement: "%"
icon: "mdi:white-balance-sunny"
```

ДОДАТОК Д

S U M M A R Y

Environmental parametrs monitoring system

Bachelor's diploma project in specialty 171 "Electronics," educational-professional program "Electronic Devices and Instruments." Tamarkin Yevhenii Serhiiovych. National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute," Faculty of Electronics, Department of Electronic Devices and Systems, group DE-11. — Kyiv: Igor Sikorsky KPI, 2025. — Scope: 3 drawing sheets (A3 format), 69 pages of explanatory note, 4 sections, 10 illustrations, 1 table, 4 appendices.

The diploma project is dedicated to the comprehensive design, development, and validation of a portable, cost-effective, and energy-efficient IoT-based system for real-time monitoring of critical environmental parameters, specifically temperature, humidity, and illuminance, with robust wireless data transmission capabilities via Wi-Fi. This applied research addresses the pressing demand for autonomous, scalable microclimate control solutions tailored for diverse applications, including precision agriculture (e.g., greenhouses, vertical farms, and automated irrigation systems), smart homes (e.g., intelligent climate regulation for occupant comfort), educational institutions (e.g., interactive IoT and sensor technology learning platforms), and localized environmental monitoring (e.g., urban ecology studies or rural conservation initiatives). The primary objective is to deliver a reliable, affordable, and user-friendly device that seamlessly integrates into modern IoT ecosystems, overcoming challenges related to sensor accuracy, power efficiency, data security, and long-term operational stability in varied environmental conditions.

The project employed a multidisciplinary methodology, integrating theoretical calculations, advanced circuit design, embedded systems programming, and rigorous experimental testing. The hardware platform is centered on the ESP32-

WROVER-I microcontroller, selected for its high-performance dual-core Xtensa LX6 processor (240 MHz), integrated Wi-Fi and Bluetooth connectivity, extensive GPIO options, and ultra-low power consumption in deep sleep mode. The system incorporates a DS18B20 digital sensor for high-precision temperature measurement, a custom-designed capacitive sensor for humidity detection, a PDV-P9003-16 photoresistor for cost-effective illuminance sensing, and a TP4056 module for efficient battery charging and power management, ensuring reliable operation on a 2000 mAh Li-Po battery. The printed circuit board (PCB) was designed using Altium Designer, adhering to industry standards for compactness, electromagnetic compatibility, and manufacturability, with careful attention to trace routing and component placement to minimize noise and power loss. The software development was conducted using the ESPHome platform, which facilitates rapid development, flexible configuration, and robust integration with Home Assistant for real-time data visualization, remote monitoring, and control via web or mobile interfaces. ESPHome's declarative YAML-based approach enabled a development timeline of 2–3 weeks, ensuring automatic optimization of power consumption and high system stability. Initial firmware prototyping was performed in Arduino IDE to fine-tune interactions with the DS18B20 temperature sensor, capacitive humidity sensor, and PDV-P9003-16 photoresistor, as well as to implement data processing algorithms, including median filtering for noise suppression. The system supports deep sleep mode with power consumption below 10 μA, automatic Wi-Fi reconnection, and buffering of up to 100 data records during connectivity disruptions.

Significant emphasis was placed on data security. Data transmission over Wi-Fi via HTTP/MQTT protocols is safeguarded with AES-256 encryption, ensuring confidentiality and integrity even in unsecured networks. Device authentication is implemented using unique tokens, preventing unauthorized access to the system. A watchdog mechanism protects against software crashes by automatically rebooting the device upon detecting anomalies. To mitigate man-in-the-middle (MITM) attacks, TLS/SSL certificates are employed for secure communication with Home Assistant. Local data storage is managed using a secure file system, minimizing risks

of data leakage in case of physical access to the device. These security measures make the system suitable for sensitive applications, such as commercial greenhouses or smart homes, where data protection is paramount. Future enhancements include the integration of two-factor authentication for the planned mobile application and support for secure over-the-air (OTA) firmware updates with digital signatures to prevent the installation of malicious software.

The developed system achieves the following key specifications: a temperature measurement range of -55…+125 °C with an accuracy of ±0.5 °C, a humidity range of 20–80 % with ±5–15 % accuracy, and an illuminance range of 0–1000 lux with ±5–20 % accuracy. The device operates autonomously for up to 1.5 months on a 2000 mAh battery, utilizing a 10-second measurement interval and deep sleep mode with power consumption below 10 μA, making it highly energy-efficient. Data is transmitted securely via Wi-Fi using HTTP/MQTT protocols, protected by AES-256 encryption to ensure confidentiality and integrity, with watchdog protection to prevent system hangs and buffering of up to 100 data records during connectivity disruptions. The PCB, constructed from FR-4 material with dimensions of 100×60 mm and class 4 accuracy, supports reliable operation under diverse conditions, with a calculated voltage drop of 0.025 V (well below the 0.165 V threshold). Reliability analysis demonstrates a probability of failure-free operation of 0.9964 over 1000 hours and a mean time to failure of 31.7 years, confirming the system's suitability for long-term, unattended deployment in challenging environments, such as agricultural fields or urban settings.

The project resulted in a portable device with an estimated production cost of 2500–3500 UAH, offering a highly competitive alternative to high-cost industrial analogs such as Vaisala HMT120, Testo 160 TH, and Rotronic HygroPalm HP23, which range from 400 to 1450 USD. While these professional systems provide superior precision in controlled environments, the proposed device matches their core functionality for temperature and humidity monitoring and extends capabilities with illuminance measurement and wireless data transmission, features absent or limited in some analogs. The novelty of the work lies in the synergistic integration

of an energy-efficient hardware platform with a modular ESPHome software architecture, incorporating adaptive data processing algorithms (e.g., median filtering for noise reduction) and robust support for IoT protocols (HTTP/MQTT). Economic efficiency is driven by the strategic use of open-source hardware and software components, low manufacturing costs, and the system's inherent scalability, enabling deployment as a standalone unit or as part of a distributed sensor network for large-scale monitoring applications. The design emphasizes ease of maintenance, with over-the-air (OTA) firmware updates, a modular structure for future upgrades, and a user-centric approach to configuration and data access.

The system is recommended for a wide range of practical applications. In agriculture, it can optimize microclimate conditions in greenhouses, vertical farms, or open-field precision agriculture, enhancing crop yield, reducing water usage, and improving resource efficiency. In smart homes, it enables automated environmental control, contributing to occupant comfort and energy savings through integration with smart thermostats or lighting systems. The device is also ideal for educational settings, serving as a hands-on platform for teaching IoT, embedded systems, sensor technologies, and data analytics, fostering practical skills in electronics engineering. Additionally, it supports localized environmental monitoring initiatives, such as urban air quality assessments, ecological conservation projects, or community-driven sustainability efforts. Future enhancements include the development of a proprietary mobile application for iOS and Android, independent of Home Assistant, to provide an intuitive, user-friendly interface for device configuration, real-time monitoring, push notifications, historical data analysis, and trend visualization, enhancing accessibility for non-technical users.

The results are ready for immediate implementation, the system can serve as a practical tool for student projects, research, and curriculum development in IoT and electronics. It is also well-suited for small-scale agricultural enterprises seeking cost-effective microclimate management solutions to enhance productivity and sustainability. The device's affordability, flexibility, and IoT compatibility position it for potential commercialization within smart home, agricultural, and

environmental IoT ecosystems, contributing to the adoption of innovative, technology-driven solutions in Ukraine and internationally. The project lays a strong foundation for further research, including the development of multi-sensor networks, advanced data analytics, and integration with emerging technologies like edge computing or machine learning for predictive environmental modeling.

Keywords: electronics, circuits, programble circuits, temperature mesurment, environmental monitoring

Summary of the project: 5 pages