

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ДЕРЖАВНИЙ ВИЩИЙ НАВЧАЛЬНИЙ ЗАКЛАД
"УЖГОРОДСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ"
ІНЖЕНЕРНО-ТЕХНІЧНИЙ ФАКУЛЬТЕТ
КАФЕДРА ЕЛЕКТРОННИХ СИСТЕМ

Шпонько Даніел Андрійович

Електронний пристрій для реалізації каналу бездротового
зв'язку

Спеціальність 171 Електроніка

Освітня програма Електронні системи

Кваліфікаційна робота

на здобуття освітнього ступеня бакалавра

Науковий керівник:

Заяць Тарас Михайлович

к.ф.-м.н., доцент

Рєєстрація _____
(номер)

« ____ » _____ 2026 р. _____ Тетянна СЕМАК
(підпис)

Кваліфікаційна робота допущена до захисту

Завідувач кафедри

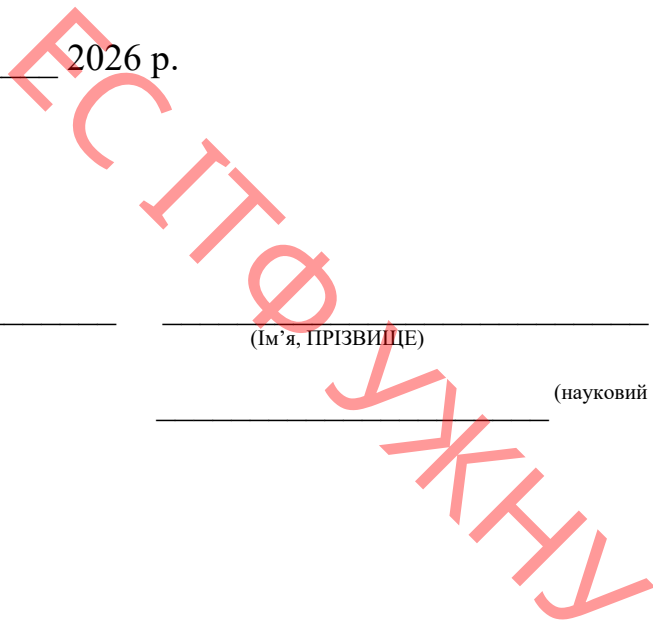
_____ Тарас ЗАЯЦЬ
(підпис)

к.ф.-м.н., доцент

« ____ » _____ 2026 р.

Рецензент _____
(підпис) (Ім'я, ПРІЗВИЩЕ)

_____ (науковий ступінь, вченє звання)



МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ДВНЗ "Ужгородський національний університет"
Інженерно-технічний факультет
Кафедра електронних систем

«ЗАТВЕРДЖУЮ»
Зав. кафедри ЕС ІТФ УжНУ,
доц. _____ (Заяць Т.М.)
" ____ " _____ 2026 р.

ПОЯСНЮВАЛЬНА ЗАПИСКА

На кваліфікаційну роботу бакалавра

на тему:

ЕЛЕКТРОННИЙ ПРИСТРІЙ ДЛЯ РЕАЛІЗАЦІЇ КАНАЛУ
БЕЗДРОТОВОГО ЗВ'ЯЗКУ

Студента групи ЕС: Даніел ШПОНЬКО

Керівник: к.ф.-м.н., доцент

Тарас ЗАЯЦЬ

Ужгород – 2026

«ЗАТВЕРДЖУЮ»
Зав. кафедри ЕС ІТФ УжНУ,
доц. _____ (Заяць Т.М.)
" ____ " _____ 2025 р.

ЗАВДАННЯ
на кваліфікаційну бакалаврську роботу
студенту Шпонько Даніелу Андрійовичу
(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема кваліфікаційної бакалаврської роботи: “Електронний пристрій для реалізації каналу бездротового зв’язку”.

Затверджені Розпорядженням декана ІТФ від " ____ " _____ 20__ року № ____

2. Термін закінчення студентом бакалаврської кваліфікаційної роботи:
20 червня 2026 року.

3. Вихідні дані до бакалаврської роботи.

Основне джерело: автономне акумуляторне живлення (Li-Ion акумулятор стандарту 1S); Контроль та зарядка. Центральний обчислювальний вузол: мікроконтролер на кристалі з низьким енергоспоживанням; Периферія: інтегровані інтерфейси UART, SPI, I2C для взаємодії з цифровими сенсорами. Параметри бездротового каналу зв'язку: Режим передачі даних: завадостійкий напівдуплексний асинхронний канал зв'язку; Частотний діапазон: безліцензійний ISM-діапазон (2.4 ГГц або субгігагерцові частоти LoRa 410...525 МГц залежно від конфігурації радіотракту); Радіус дії: не менше 100 метрів у локальних Wi-Fi/Bluetooth мережах та можливість масштабування за рахунок трансиверів тривалого радіусу дії (до 5-10 км при LoRa).

4. Зміст пояснювальної записки (перелік питань, що підлягають розробці).

Вступ.

1. Огляд та аналіз аналогів об'єкту проектування.
2. Проектно – конструкторський розділ.

Висновки.

Список використаних джерел.

5. Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень):

1. Структурна схема.
2. Принципова електрична схема.

6. Консультанти розділів роботи.

Розділ	Консультант	Підпис, дата	
		Завдання видав	Завдання прийняв
1,2		Доц. Заяць Т.М.	Шпонько Д.А.
Н. контроль	Папп О.В.		

7. Дата видачі завдання " " 2025 року.

Керівник роботи _____ Заяць Т.М.
(підпис)

Завдання прийняв на виконання _____ Шпонько Д.А.
(підпис)

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів виконання КБР	Термін виконання етапів	Примітки
1	Пошук та аналіз аналогів об'єкта досліджень.	до 20.12.2025 року	
2	Огляду та аналіз аналогів.	до 20.02.2026 року	
3	Вибір технічного рішення та обґрунтування технічної пропозиції.	до 20.03.2026 року	
4	Синтез структурної та принципової схем, їх розрахунок.	до 20.04.2026 року	
5	Виготовлення конструкторської документації.	до 20.05.2026 року	
6	Оформлення кваліфікаційної бакалаврської роботи.	до 10.06.2026 року	
7	Захист на державній екзаменаційній комісії.	Згідно з графіком захисту	

Студент _____ (Д.А. Шпонько)
(підпис)

Керівник роботи _____ (доц. Т.М. Заяць)
(підпис)

РЕФЕРАТ

Пояснювальна записка кваліфікаційної роботи бакалавра містить: 57 сторінки, 32 рисунки, 8 таблиці, 3 додатки, 12 джерел посилань.

Сучасний етап розвитку електронної техніки та інженерії засобів автоматизації характеризується масовим розширенням концепції Інтернету речей (IoT), бездротової телеметрії та віддаленого моніторингу навколишнього середовища. Створення надійних, енергоефективних та економічно доступних пристроїв локального зв'язку є актуальним інженерним завданням у зв'язку з високою вартістю та обмеженою гнучкістю дротової інфраструктури.

Об'єкт дослідження – процеси бездротової передачі цифрової інформації, збору телеметричних даних та формування завадостійких локальних каналів зв'язку в безліцензійних частотних діапазонах.

Мета роботи – проектування, схемотехнічна реалізація та дослідження енергоефективного електронного пристрою для забезпечення напівдуплексного бездротового зв'язку, збору кліматичних метрик.

Методи дослідження – методи системного аналізу існуючих бездротових технологій (Wi-Fi, Bluetooth, ZigBee, LoRa), теорії цифрової обробки сигналів та завадостійкого кодування, схемотехнічного моделювання електронних вузлів.

У роботі проведено порівняльний аналітичний огляд сучасної елементної бази бездротових модулів (ESP32, ESP8266, промислових 4G/5G рішень). На основі сформованого технічного завдання розроблено структурну та принципову електричну схеми пристрою, обґрунтовано вибір компонентів системи живлення, обчислювального ядра та вузлів фільтрації високочастотних завад.

Ключові слова:

БЕЗДРотовий зв'язок, мікроконтролер, ESP32, телеметрія,
завадостійкість, схемотехніка

ABSTRACT

The explanatory note of the bachelor's qualification work contains: 57 pages, 32 figures, 8 tables, 3 appendices, 12 sources of references.

The modern stage of development of electronic equipment and engineering of automation means is characterized by a massive expansion of the concept of the Internet of Things (IoT), wireless telemetry and remote monitoring of the environment. The creation of reliable, energy-efficient and economically accessible local communication devices is an urgent engineering task due to the high cost and limited flexibility of the wired infrastructure.

The object of research is the processes of wireless transmission of digital information, collection of telemetric data and formation of interference-resistant local communication channels in unlicensed frequency ranges.

The purpose of the work is the design, circuit implementation and research of an energy-efficient electronic device to provide half-duplex wireless communication, collection of climatic metrics.

Research methods – methods of system analysis of existing wireless technologies (Wi-Fi, Bluetooth, ZigBee, LoRa), theory of digital signal processing and noise-resistant coding, circuit modeling of electronic nodes.

The work provides a comparative analytical review of the modern element base of wireless modules (ESP32, ESP8266, industrial 4G/5G solutions). Based on the formed technical task, a structural and principle electrical diagram of the device was developed, the choice of components of the power system, computing core and high-frequency interference filtering nodes was justified.

Keywords:

WIRELESS COMMUNICATION, MICROCONTROLLER, ESP32,
TELEMETRY, INTERFERENCE IMMUNITY, CIRCUIT TECHNIQUE

Зміст

ВСТУП.....	9
1 ОГЛЯД І АНАЛІЗ АНАЛОГІВ	10

1.1. Загальна характеристика та класифікація бездротових модулів зв'язку.....	10
1.2. Аналіз сучасної доступної елементної бази бездротових модулів.....	16
1.3. Практичні аспекти міжплатного бездротового зв'язку на базі трансиверів LoRa SX1278	24
2. ПРОЄКТНО - КОНСТРУКТОРСЬКИЙ РОЗДІЛ.....	32
2.1. Розробка структурної схеми електронного пристрою	32
2.2. Апаратне забезпечення електронного пристрою	33
2.3 Розробка принципової схеми електронного пристрою	45
2.4 Розрахунки елементів схеми	45
ВИСНОВКИ.....	51
СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ.....	52
ДОДАТКИ.....	54

ЕЛЕКТРОФУЖНУ

					КРБ.ЕС.10314853.01.000 ПЗ					
					Електронний пристрій для реалізації каналу бездротового зв'язку Пояснювальна записка					
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата				Літера	Аркуш	Аркушів
Розробив		Шпонько Д.А						У	7	57
Перевірив		Ваяць Т.М						УжНУ, ІТФ, 4 курс Група ЕС		
Т. контр.										
Н.Контр.		Пап О.В.								
Затв.		Ваяць Т.М								

ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ ТА УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ

АЦП – аналого-цифровий перетворювач

МК – мікроконтролер

BLE – Bluetooth Low Energy (Енергоефективна технологія Bluetooth)

CPE – Customer Premises Equipment (Абонентське обладнання зв'язку)

GPIO – General Purpose Input/Output (Програмовані виводи загального призначення)

GSM – Global System for Mobile Communications (Глобальна система мобільного зв'язку)

I2S – Inter-IC Sound (Інтерфейс для передачі цифрового звуку)

ISM – Industrial, Scientific and Medical radio band (Безліцензійний промисловий, науковий та медичний діапазон радіочастот)

IoT – Internet of Things (Інтернет речей)

LPWAN – Low-Power Wide-Area Network (Енергоефективна мережа великого радіусу дії)

MCU – Microcontroller Unit (Мікроконтролерний пристрій)

MIMO – Multiple Input Multiple Output (Метод багатоканального прийому/передачі сигналу)

RFID – Radio-Frequency Identification (Радіочастотна ідентифікація)

SPI – Serial Peripheral Interface (Послідовний периферійний інтерфейс)

UART (USART) – Universal Asynchronous Receiver-Transmitter (Універсальний асинхронний приймач-передавач)

USB – Universal Serial Bus (Універсальна послідовна шина)

Wi-Fi – Wireless Fidelity (Технологія бездротових локальних мереж на базі IEEE 802.11)

Вим.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

КРБ.ЕС.10314853.01.000 ПЗ

Арк.

7

ВСТУП

На сьогоднішній день автоматизація житлового та виробничого простору є одним із провідних напрямків розвитку електронних та комп'ютерних технологій. Стрімке розширення концепції Інтернету речей (IoT), систем «розумний будинок», засобів бездротової телеметрії та віддаленого моніторингу вимагає створення надійних, енергоефективних та економічно доступних пристроїв зв'язку.

Традиційні дротові інтерфейси збору даних у багатьох сценаріях є неефективними через високу вартість монтажу, вразливість до механічних пошкоджень та обмежену гнучкість архітектури. Водночас поширені бездротові стандарти, такі як Wi-Fi або GSM, характеризуються високим рівнем енергоспоживання, складністю програмних стеків та надлишковою вартістю компонентів для локальних завдань мікроклімату та релейного керування.

У зв'язку з цим виникає потреба в розробці локальних автономних систем, які функціонують у безліцензійному частотному діапазоні (ISM), мають низьку собівартість, мінімальне енергоспоживання і здатні надійно працювати в умовах промислових та побутових завод. Проектування електронного пристрою, який інтегрує збір кліматичних метрик та реалізує заводостійкий напівдуплексний канал зв'язку для передачі асинхронних команд, є актуальним інженерним та науково-практичним завданням.

Вим.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

РОЗДІЛ 1. ОГЛЯД ТА АНАЛІЗ АНАЛОГІВ

1.1. Загальна характеристика та класифікація бездротових модулів зв'язку

Сучасний етап розвитку електронної техніки та інженерії систем Інтернету речей (IoT) характеризується масовою інтеграцією бездротових комунікаційних інтерфейсів у структуру засобів автоматизації, телеметрії, систем контролю доступу (СКД), моніторингу транспортних засобів, побутової електроніки та розподіленого промислового обладнання. Використання готових бездротових комунікаційних модулів у процесі проектування друкованих плат (PCB) є стандартною інженерною практикою. Це дозволяє суттєво скоротити терміни розробки та виходу готового виробу на ринок, забезпечити високу сумісність, адаптацію до складних умов експлуатації, масштабованість архітектури, а також створювати надлишкові (резервовані) системи зв'язку.

Загальний вигляд сучасних бездротових модулів комерційного та промислового призначення наведено на рис. 1.1.

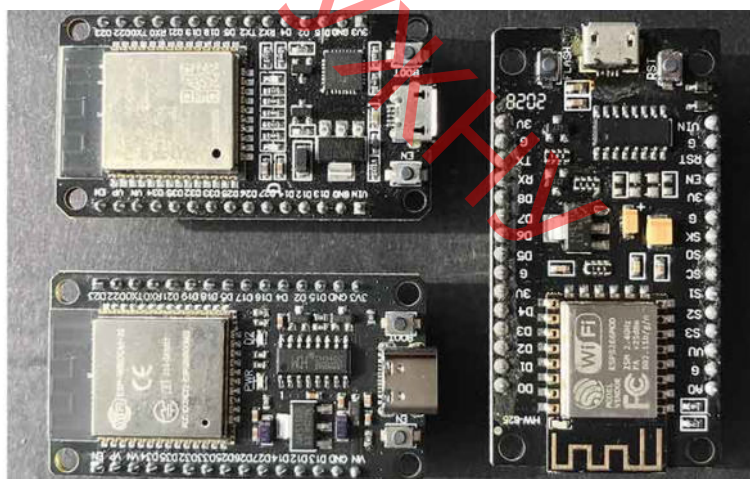


Рисунок 1.1. Конструктивні варіанти виконання сучасних бездротових комунікаційних модулів [1]

При аналізі та виборі модуля бездротового зв'язку критично важливим є глибоке вивчення його технічних параметрів. Формат даних, номінальна швидкість передачі та характеристики інтегрованого джерела живлення визначають придатність конкретного електронного компонента для

Вим.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

вирішення поставленого завдання. Незалежно від топології мережі (зв'язок на короткі чи великі відстані), розуміння цих параметрів є ключем до прийняття обґрунтованого схемотехнічного рішення.

Апаратною основою будь-якої бездротової комунікаційної плати є мікроконтролер (MCU) або система на кристалі (SoC). Дана інтегральна мікросхема здійснює цифрову обробку сигналів, керує стеком протоколів та забезпечує бездротовий зв'язок. Серед сучасних архітектур найбільш поширеними є рішення на базі чіпів ESP32, ESP8266, PIC16F684 та інших напівпровідникових структур.

Конструктивно бездротовий модуль являє собою мініатюрний компактний вузол, топологія якого оптимізована для забезпечення ефективного розсіювання тепла та збереження цілісності сигналу (Signal Integrity). Він містить радіоприймач для мережевого підключення та антену (інтегровану у вигляді друкованого провідника або підключену через роз'єм) для бездротової передачі та прийому радіосигналу. Крім того, на платі модуля реалізовано ефективну систему керування живленням, що є критично важливим для автономних пристроїв із живленням від гальванічних елементів або акумуляторів. Даний вузол базується на схемах лінійного або імпульсного регулювання напруги та високочастотної фільтрації завад.

Залежно від радіусу дії, топології мережі та вимог до пропускної здатності, сучасні бездротові модулі класифікують за використовуваними протоколами зв'язку:

Технологія Bluetooth. Функціонує у частотному діапазоні ISM 2,4–2,485 ГГц. Призначена для побудови персональних мереж (PAN) короткого радіусу дії між пристроями. Забезпечує швидке підключення вузлів до мережі (до 10 секунд) та номінальну швидкість передачі даних близько 1 Мбіт/с. Конструктивний вигляд типового модуля Bluetooth наведено на рисунку 1.2.

Вим.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

КРБ.ЕС.10314853.01.000 ПЗ

Арк.

10



Рисунок 1.2. Бездротовий комунікаційний модуль радіусу дії Bluetooth [1]

Серед доступних на ринку модулів даного класу та їхніх цільових застосувань виділяють:

- HC-05: потокове аудіо, передача даних, обмін файлами, ігрові контролери;
- HC-06: базова передача даних, бездротовий послідовний зв'язок UART, системи дистанційного керування;
- ESP32 BLE: пристрої розумного дому, системи промислової автоматизації, додатки Інтернету речей;
- BTM005: медичні пристрої, смарт-годинники, інтерактивні підключені іграшки;
- nRF5340: високотехнологічні носимі пристрої, високоякісний бездротовий звук (LE Audio), складні промислові IoT-мережі.

Технологія Wi-Fi. Універсальна технологія бездротових локальних мереж, стандартизована інститутом IEEE за специфікацією 802.11. Wi-Fi є основою сучасних систем зв'язку побутового та офісного рівнів. Технологія

Вим.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

забезпечує радіус дії до 100 метрів та швидкість передачі даних до 54 Мбіт/с у базовому діапазоні частот 2,4 ГГц. Найпоширенішим Wi-Fi модулем у сучасній бюджетній електроніці є ESP8266 (рисунок 1.3), який працює в діапазоні від 2,4 ГГц до 2,5 ГГц. Варто зазначити, що всі сучасні мікроконтролери компанії Espressif, включаючи серії ESP32 та ESP8266, інтегрують апаратні стек-протоколи Bluetooth та Wi-Fi на одному кристалі.



Рисунок 1.3. Інтегрований бездротовий модуль стандарту Wi-Fi на базі чіпа ESP8266 [1]

Технологія ZigBee. Даний протокол розвинувся як альтернатива Bluetooth з метою усунення таких обмежень, як високе енергоспоживання та малий радіус дії. ZigBee оптимізовано під жорсткі вимоги промислової автоматизації. Проста конструкція, висока стійкість до завад, надійна верифікація передачі даних та економічна ефективність роблять його універсальним рішенням для побудови комірчастих (mesh) мереж. Відстань зв'язку в мережах ZigBee охоплює діапазон від десятків і сотень метрів до кількох кілометрів.

Прикладом промислової реалізації є модуль u-blox AG NORA-B20 Series, який поєднує технології Bluetooth та ZigBee зі швидкістю передачі даних до 2 Мбіт/с. Аналогічно, модуль Digi XBee 802.15.4 (рисунок 1.4) працює на частоті 2,4 ГГц і розроблений для застосувань із критично низькою затримкою сигналу.

Вим.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата



XBee Module



XBee Pin Configuration

Рисунок 1.4. Промисловий бездротовий модуль стандарту ZigBee [1]

Технологія LoRa (Long Range). Бездротові модулі на базі технології LoRa використовуються для побудови енергоефективних мереж великого радіусу дії (LPWAN). Даний протокол орієнтований на автономні пристрої з живленням від батарей, які виконують завдання телеметрії в географічно розподілених зонах: зважування диких тварин, вимірювання вологості та температури в лісових масивах, відстеження порушень національних кордонів тощо. Такі системи здатні транслювати пакети даних на шлюзи та смартфони на відстані тисяч миль через хмарні сервери.

Прикладом радіочастотного модуля на основі технології LoRa є пристрій MCM78SPI (рисунок 1.5).

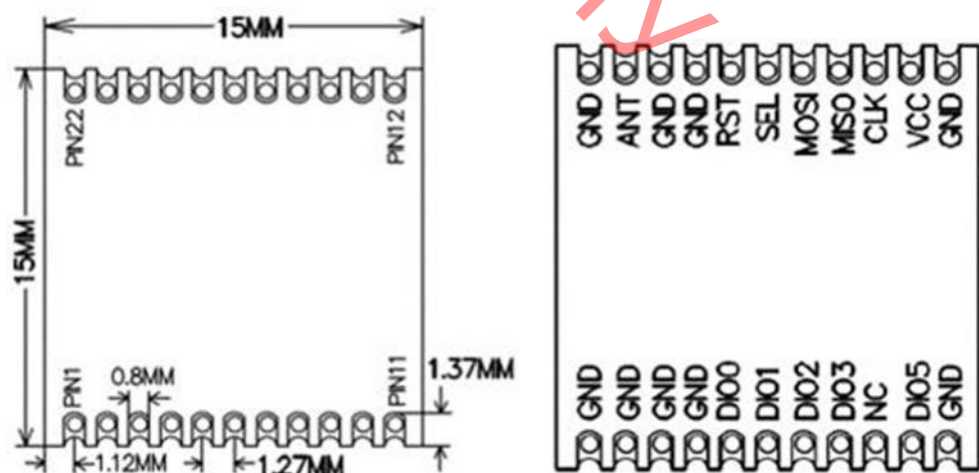


Рисунок 1.5. Радіочастотний комунікаційний модуль дальнього радіусу дії LoRa [1]

Вим.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

Даний модуль має такі функціональні та електрофізичні характеристики:

- робоча напруга живлення: 1,8...3,7 В;
- робочий діапазон частот: 410...525 МГц;
- максимальна потужність передавача: 19 \pm 1 \text{ дБм};
- надвисока чутливість прийомного тракту: $-136 \pm 1 \text{ дБм}$ (при швидкості передачі 250 біт/с);
- ефективна відстань зв'язку в умовах прямої видимості (відкритий простір): до 5 км при швидкості 250 біт/с.

Практичне застосування технології LoRa продемонстровано на прикладі побудови комплексної системи моніторингу та запобігання лісовим пожежам (рисунок 1.6). У наведеній архітектурі максимальна дальність видимості сигналу становить 5 кілометрів. Комбінація одного базового шлюзу та ретранслятора (реле) дозволяє контролювати бездротові датчики в радіусі до 10 кілометрів. У зонах із незадовільним покриттям стільникових мереж 4G, передача даних дублюється через супутникові системи зв'язку.



Рисунок 1.6. Структурна схема системи запобігання лісовим пожежам на базі бездротових технологій [1]

Стільниковий зв'язок (3G, 4G, 5G). Протоколи стільникового зв'язку базуються на складній цифровій обробці сигналів та забезпечують високопродуктивну передачу великих обсягів даних. Мережі розгорнуті глобальними операторами для мобільного доступу до Інтернету та голосового зв'язку. Стійкі до складних заводових середовищ промислові цифрові радіостанції стільникового типу забезпечують великі відстані

Вим.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

передачі інформації. При цьому мінімальні швидкості для телеметричних застарілих каналів становлять близько 19,2 Кбіт/с, тоді як сучасні стандарти оперують гігабітними потоками. Основними деструктивними факторами стільникових модулів є висока вартість обладнання, схемотехнічна складність обв'язки та підвищені вимоги до енергоспоживання під час монтажу системи.

Крім базових протоколів, у сучасній електроніці використовуються спеціалізовані бездротові технології, такі як RFID (радіочастотна ідентифікація), NFC (ближній безконтактний зв'язок), Thread, Z-Wave та Sigfox.

1.2. Аналіз сучасної доступної елементної бази бездротових модулів

При проектуванні сучасних друкованих плат розробнику доступний широкий спектр високоефективних та економічно вигідних комунікаційних модулів. До найбільш поширених на рисунку рішень належать: ESP32, ESP8266, Quectel EC200N-CN, Neoway N720 4G, Fibocom FM160-NA та Simcom SIM8200EA-M2 5G.

Модулі серій ESP32 та ESP8266 орієнтовані на застосування в інфраструктурі Інтернету речей (IoT) та вимагають наявності локального мережевого середовища, організованого Wi-Fi маршрутизатором. Інші перелічені промислові модулі стільникового зв'язку не потребують зовнішнього Wi-Fi середовища; встановлення SIM-картки в інтегрований слот перетворює проектований пристрій на автономний комунікаційний вузол мережі.

1.2.1. Системи на кристалі ESP32 та ESP8266

Чіпи ESP32 та ESP8266 оснащені вбудованими на апаратному рівні функціями Bluetooth та Wi-Fi, що звільняє інженера від необхідності самостійної інтеграції та узгодження радіочастотних трактів. Ринкова вартість даних чіпів становить 2–3 доларів США, що робить їх оптимальним вибором для серійного виробництва та стартапів.

Вим.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

КРБ.ЕС.10314853.01.000 ПЗ

Арк.

15

До відомої серії ESP32 належать такі модифікації кристалів, як ESP32-D0WD-V3, ESP32-D0WDR2-V3, ESP32-U4WDH, а також версії, що перебувають у статусі NRND (не рекомендовані для нових розробок): ESP32-S0WD, ESP32-D0WD, ESP32-D0WDQ6 та ESP32-D0WDQ6-V3. Загальний вигляд стандартного модуля ESP32 наведено на рис. 1.7.



Рисунок 1.7. Бездротовий модуль системи на кристалі серії ESP32 [1]

Модулі ESP32 характеризуються низьким енергоспоживанням у режимах глибокого сну (Deep Sleep), високою адаптивністю та розвинутою системою периферійних інтерфейсів, яка включає:

- 34 програмовані виводи загального призначення (GPIO), з яких: 5 GPIO використовуються для конфігурації (зв'язування), 6 GPIO функціонують виключно як входи, 6 GPIO задіяні для зв'язку зі вбудованою флеш-пам'яттю/PSRAM (у моделях ESP32-D0WDR2-V3 та ESP32-U4WDH);
- 12-бітний АЦП послідовного наближення (SAR ADC) розрядністю до 18 каналів;
- два незалежні 8-бітні ЦАП (DAC);
- 10 ємнісних сенсорних датчиків (Touch Sensors);
- 4 незалежні інтерфейси SPI;
- 2 інтерфейси для передачі цифрового звуку I2S;
- 2 міжінтегральні шини I2C;
- 3 послідовні порти UART;
- 1 хост-контролер для карт пам'яті та обміну даними (SD/eMMC/SDIO) та 1 ведений пристрій (SDIO/SPI);

Вим.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

- апаратний інтерфейс Ethernet MAC з виділеним контролером прямого доступу до пам'яті (DMA) та апаратною підтримкою часової синхронізації стандарту IEEE 1588;
- модуль контролера автомобільної шини TWAI®, повністю сумісний зі стандартом ISO 11898-1 (специфікація CAN 2.0);
- модуль дистанційного керування RMT (передавання/прийняття ІЧ-сигналів);
- спеціалізовані модулі ШІМ (PWM) для керування електродвигунами та світлодіодними драйверами (до 16 каналів).

Для порівняння, топологія та призначення виводів (розпиновка) базового модуля попереднього покоління ESP8266 наведена на рисунку 1.8.

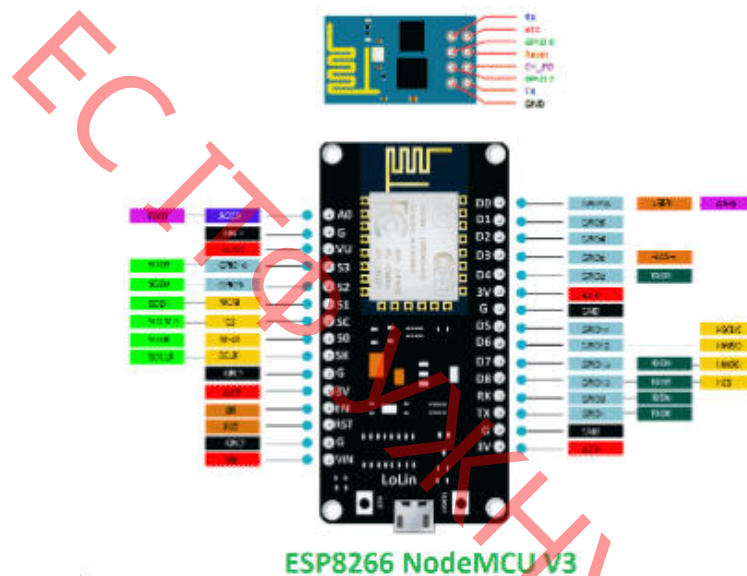


Рисунок 1.8. Графічна схема розташування та призначення виводів модуля ESP8266 [1]

До номенклатурної серії ESP8266 входять однокристальні системи ESP8266EX та ESP8285, готові модулі ESP-WROOM-O2D/O2U, ESP-WROOM-O3, а також налагоджувальні комплекти розробника ESP8266-DevKitC та ESP-Launcher. Чіп ESP8266 підтримує три режими мережевої дії: станція (STA), точка доступу (AP) та комбінований режим (STA+AP). Схемотехнічно модуль підтримує інтерфейси USART, GPIO, IIC, PWM, ADC та SPI. Його використання доцільне для додавання мережевих функцій існуючим пристроям, створення автономних мережевих контролерів або

Вим.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

використання модуля як центрального процесора додатків у системах розумних будівель, розумного транспорту та цифрового промислового керування.

1.2.2. Промисловий модуль Quectel EC200N-CN

Модуль EC200N-CN (рисунок 1.9) є високоінтегрованим бездротовим комунікаційним пристроєм стандарту LTE Cat 1 (Long-Term Evolution Category 1), розробленим компанією Quectel.



Рисунок 1.9. Стільниковий комунікаційний модуль стандарту LTE Cat 1 Quectel EC200N-CN [1]

Він орієнтований на застосування у сферах міжмашинної взаємодії (M2M) та промислового Інтернету речей (IoT), включаючи системи OTT (over-the-top), клієнтське обладнання зв'язку (CPE), маршрутизатори, карти передачі даних, планшети, інтелектуальні комплекси безпеки та промислові КПК.

Фізичні габарити модуля становлять $29,0 \times 32,0 \times 2,4$ мм при робочому діапазоні температур від -35 °C до $+75$ °C. Модуль підтримує такі стандарти стільникового зв'язку та частотні діапазони:

- довгострокова еволюція з частотним поділом каналів (LTE-FDD): частотні діапазони B1/B3/B5/B8;
- довгострокова еволюція з часовим поділом каналів (LTE-TDD): діапазони B34/B38/B39/B40/B41;

Вим.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

- глобальна система мобільного зв'язку з підтримкою високошвидкісної передачі (GSM/EDGE) (опціонально): діапазони B3/B8;
- інтегрована глобальна навігаційна супутникова система ГНСС (опціонально): супутникові угруповання GPS/BeiDou.

Функціональний стек модуля Quectel EC200N-CN підтримує технологію синтезу мовлення із тексту (TTS), запис та відтворення аудіосигналів, навігаційний зв'язок, пряме керування рідкокристалічними РК-дисплеями за допомогою графічної бібліотеки з відкритим кодом Lvgl, інтерфейси Ethernet, бездротове оновлення вбудованого ПЗ (FOTA), сканування Wi-Fi мереж, здійснення голосових викликів, захищений шар сокетів USSD та обробку SMS.

1.2.3. Промисловий модуль Neoway N720 4G

Модуль N720 (рисунок 1.10) є високосертифікованим промисловим бездротовим комунікаційним модулем стандарту Netcom 4G від компанії Neoway. Його архітектура оптимізована для побудови бездротових терміналів автоматизованого зчитування лічильників енергоресурсів (АСКОЕ), автомобільних бортових дисплеїв, портативних POS-терміналів та магістральних промислових маршрутизаторів.



Рисунок 1.10. Промисловий бездротовий Netcom 4G модуль Neoway N720 [1]

Геометричні розміри корпусу становлять 30,0 × 28,0 × 2,8 мм, а розширений робочий температурний діапазон відповідає жорстким промисловим стандартам: від -40 °С до +85 °С. Частотна сітка та підтримувані протоколи зв'язку модуля N720 включають:

- LTE FDD: діапазони B1/B3/B5/B8;

Вим.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

- LTE TDD: діапазони B38/B39/B40/B41;
- TD-SCDMA: частотні канали B34/B39;
- UMTS: канали B1/B8;
- CDMA2000 1X/EV-DO: частотна зона BC0;
- застарілі протоколи зв'язку GPRS/EDGE: частоти 900/1800 МГц.

Схемотехнічна периферія модуля N720 представлена такими інтерфейсами: звукові канали PCM/I2S, два канали АЦП, одна відкрита шина I2C, один відкритий порт SPI, два порти UART, високошвидкісний USB 2.0, апаратні лінії керування PWRKEY_N та RESET_N, канали сигналів DTR, NET_LIGHT, слот для карт USIM (номінали напруг 1,8 В / 3,0 В), відкриті інтерфейси SGMII, SDIO 3.0 та шина підключення зовнішніх SD-карт пам'яті. Важливою інженерною перевагою є підтримка вторинної розробки додатків на базі вбудованого операційного середовища OpenLinux із наданням офіційних API-інтерфейсів для спрощення архітектури кінцевого продукту.

1.2.4. Високошвидкісний модуль Fibocom FM160-NA 5G

Модуль FM160-NA (рисунок 1.11) є високотехнологічним бездротовим комунікаційним пристроєм п'ятого покоління (5G), розробленим корпорацією Fibocom. Сферою застосування модуля є проектування високошвидкісних абонентських пристроїв зв'язку CPE, інтелектуальних ТВ-приставок (STB), інфраструктури промислового Інтернету речей (Industrial IoT) та автомобільних інтелектуальних систем зв'язку (V2X). Модуль адаптований під частотні стандарти стільникових мереж Північної Америки та здійснює обмін даними в рамках чотирьох мережевих стандартів: NR, LTE-TDD, LTE-FDD та широкосмугового кодового поділу каналів WCDMA.

Вим.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

КРБ.ЕС.10314853.01.000 ПЗ

Арк.

20



Рисунок 1.11. Високошвидкісний комунікаційний модуль стандарту 5G
Fibocom FM160-NA [1]

Конструктивні розміри модуля становлять $30 \times 52 \times 2,3$ мм, температурний робочий режим: від -30 °C до $+75$ °C. Частотна конфігурація та швидкісні параметри FM160-NA характеризуються такими показниками:

- стандарт LTE-FDD: частотні канали B2/4/5/12/13/29/30/66/71;
- стандарт LTE-TDD: канали B41/46 (LAA)/48;
- частотний спектр частот Sub-6 ГГц для мереж 5G: канали n2/5/12/14/25/30/41/48/66/70/71/77;
- вбудована супутникова навігація ГНСС: повна підтримка GPS/ГЛОНАСС/Galileo/BeiDou/QZSS;
- технологія багатоканального прийому/передачі NR (New Radio) MIMO: режим DL 4x4 MIMO для каналів n2/5/12/14/25/30/41/48/66/70/71/77 та режим UL 2x2 MIMO для каналів n41/77;
- режим багатоканальності LTE MIMO: конфігурація DL 4x4 MIMO для діапазонів B2/4/5/12/13/30/41/48/66/71;
- гранична швидкість у режимі автономної архітектури 5G (NR SA): до 2470 Мбіт/с на приймання (DL) та до 900 Мбіт/с на віддачу (UL);
- швидкість у комбінованому режимі NR ENDC: до 3470 Мбіт/с (DL) та до 555 Мбіт/с (UL);
- обмежені швидкості в режимі LTE: до 1600 Мбіт/с (DL) та до 211 Мбіт/с (UL).

Вим.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

КРБ.ЕС.10314853.01.000 ПЗ

Арк.

21

З боку інтерфейсної обв'язки модуль FM160-NA підтримує передачу високоякісного цифрового голосу за технологіями VoLTE та VoNR, відправку SMS через IP-протоколи (IMS), швидкісні шини USB 3.1/3.0, USB 2.0, PCIe 4.0, а також сумісний на рівні драйверів із ядрами операційних систем Windows, Linux та Android.

1.2.5. Модуль 5G Simcom SIM8200EA-M2

Модуль SIM8200EA-M2 (рисунок 1.12) є представником сімейства надшвидкісних бездротових модулів 5G від компанії Simcom. Він знаходить застосування при проектуванні шлюзів CPE, інтелектуальних систем керування дронами та БПЛА, комплексів передачі потокового відео високої чіткості в реальному часі, телемедичного обладнання та інтелектуальних бездротових систем безпеки. Даний компонент розроблений для систем, які потребують стабільної гігабітної швидкості передачі цифрових даних у важких умовах багатопроменевого поширення радіохвиль.

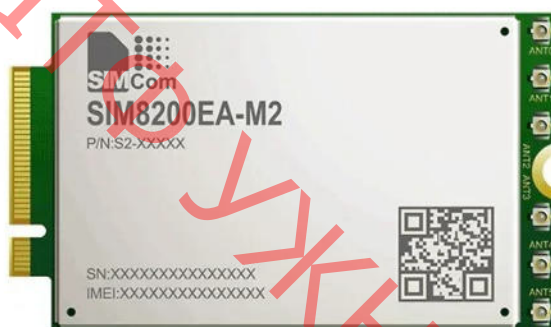


Рисунок 1.12. Промисловий бездротовий комунікаційний модуль Simcom SIM8200EA-M2 у форматі M.2 [1]

Конструктивне виконання пристрою відповідає стандарту роз'ємів M.2 із габаритами 52,0 × 30,0 × 2,3 мм, працездатність гарантується при температурах від -30 °C до +70 °C. Частотний спектр та стандарти зв'язку специфікації SIM8200ER15 5G NSA/SA включають:

- технологія Sub-6G в автономному режимі (SA): канали n1/n2/n3/n5/n7/n8/n12/n20/n28/n38/n40/n41/n48/n66/n71/n77/n78;
- технологія Sub-6G у неавтономному режимі (NSA): канали n41/n77/n78;

Вим.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

- магістральні канали зв'язку LTE-FDD: повний спектр B1/B2/B3/B4/B5/B7/B8/B12/B13/B14/B17/B18/B19/B20/B25/B26/B28/B29/B30/B32/B66/B71;
- канали тимчасового розділу LTE-TDD: діапазони B34/B38/B39/B40/B41/B42/B43/B48;
- широкосмуговий стандарт WCDMA: канали B1/B2/B3/B4/B5/B8;
- інтегрований навігаційний приймач ГНСС: канали GPS L1/Galileo/QZSS/GPS L5/ГЛОНАСС/BeiDou/Compass.

Схемотехнічне підключення модуля реалізується через високошвидкісні системні інтерфейси PCIe та USB 3.1, набір програмованих виводів GPIO, а також інтерфейс підключення SIM-карт із номінальною напругою живлення 1,8 В та 2,95 В. Модуль повністю підтримує специфікацію стандарту 3GPP R15 5G, забезпечуючи сумарну швидкість передачі цифрових даних до 4 Гбіт/с.

Висновки по підрозділам 1.1 та 1.2

Проведений аналіз показує, що сучасні модулі бездротового зв'язку забезпечують безперебійний та надійний обмін даними між різними рівнями електронних систем. Завдяки широкому охопленню таких технологій, як Wi-Fi, Bluetooth, ZigBee, LoRa та стільникових мереж 4G/5G, дані компоненти пропонують високу універсальність та функціональність для інженерного проектування.

Проте, успішна інтеграція бездротового модуля на етапі трасування друкованої плати (PCB design) вимагає суворого дотримання правил високочастотної схемотехніки: точного розрахунку хвильового опору мікрополоскових ліній, грамотного розміщення антени, створення суцільних заземлювальних поверхонь (Ground Planes) для екранування, встановлення блокувальних та розділових конденсаторів безпосередньо біля виводів живлення, а також урахування технологічних можливостей виробництва. Дотримання цих фундаментальних інженерних принципів дозволяє створювати високопродуктивні, надійні та економічно ефективні електронні пристрої з бездротовим каналом зв'язку.

Вим.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

КРБ.ЕС.10314853.01.000 ПЗ

Арк.

23

1.3. Практичні аспекти міжплатного бездротового зв'язку на базі трансиверів LoRa SX1278

У сучасних розподілених системах Інтернету речей (IoT), міжмашинної взаємодії (M2M) та концепції Індустрії 4.0 технологія LoRa займає провідні позиції завдяки поєднанню ультранизького енергоспоживання та надвеликого радіусу дії в рамках некомерційних мереж LoRaWAN. На практиці розробка таких комплексів базується на інтеграції трансиверів із різними обчислювальними платформами [2].

1.3.1. Організація шлюзу зв'язку «Arduino Uno — Raspberry Pi»

Типовим архітектурним рішенням для локального збору даних із наступною маршрутизацією у глобальну мережу є зв'язка, де мікроконтролерна плата Arduino виступає в ролі передавача (сервера), а одноплатний комп'ютер Raspberry Pi — в ролі приймача (клієнта). На загальній схемі функціонування комплексу (рисунок 1.13) показано процес трансляції даних.

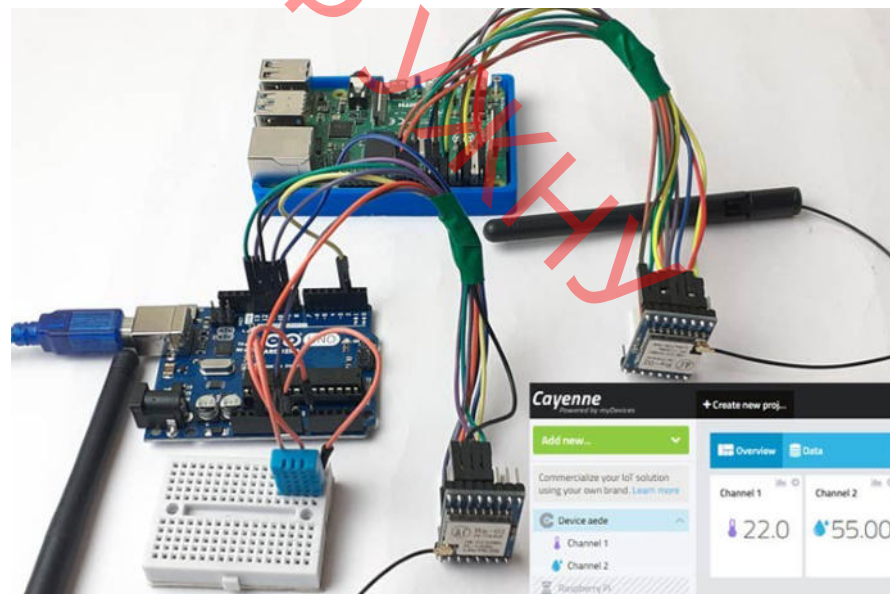


Рисунок 1.13. Структурна схема бездротового зв'язку між Arduino та Raspberry Pi за допомогою модулів LoRa SX1278 [2]

До передавальної сторони (сервера) підключено первинний напівпровідниковий датчик температури та вологості DHT11. Отримані з датчика телеметричні параметри кодуються контролером Arduino Uno та

Вим.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

трансляються через радіочастотний модуль LoRa SX1278 на приймальну сторону. Базова станція на основі Raspberry Pi приймає радіопакети, декодує їх та через вбудований стек TCP/IP публікує отримані показники на хмарній IoT-платформі Cayenne.

Електрична принципова схема вузла передавача, що ілюструє сполучення Arduino Uno з модулем LoRa та датчиком DHT11, наведена на рисунку 1.14.

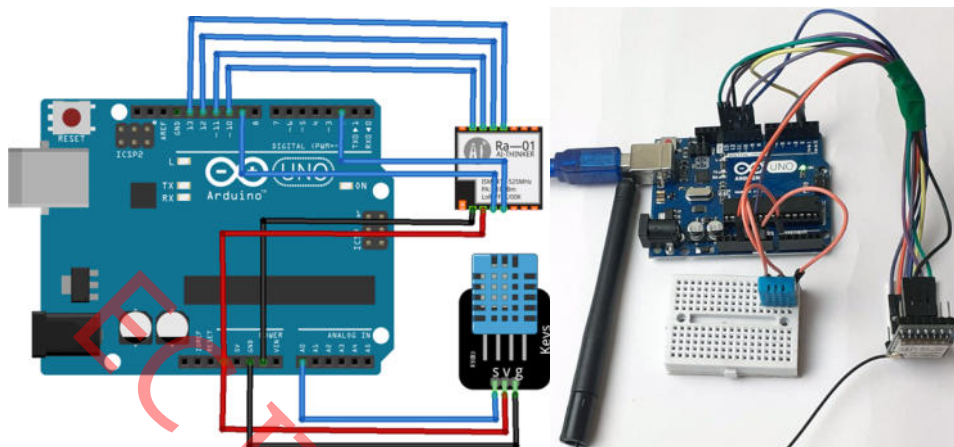


Рисунок 1.14. Схема електрична підключення датчика DHT11 та трансивера LoRa до мікроконтролера Arduino Uno [2]

Модуль LoRa SX1278 має 16-контактний інтерфейсний роз'єм, що включає шість ліній введення-виведення загального призначення (GPIO) та чотири контакти заземлення (GND). Дана мікросхема має робочу напругу живлення 3,3 В, тому її вивід живлення підключається до відповідного виходу лінійного стабілізатора плати Arduino Uno. Зчитування даних із цифрового датчика DHT11 реалізовано через аналогово-цифровий контакт A0, який програмно конфігурується як цифровий вхід. Повна схема міжплатних з'єднань передавального вузла наведена у таблиці 1.2.

Таблиця 1.2. Схема електричних з'єднань трансивера LoRa SX1278 та датчика DHT11 з Arduino Uno [2].

Вивід модуля LoRa SX1278	Вивід Arduino Uno	Вивід датчика DHT11	Призначення інтерфейсної лінії
3.3V	3.3V	—	Напруга живлення радіотракту
GND	GND	—	Спільна шина заземлення
NSS	D10	—	Вибір веденого пристрою на шині SPI (Slave)

Вим.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата
------	------	----------	--------	------

			Select)
DIO0	D2	—	Лінія апаратного переривання мікроконтролера
SCK	D13	—	Системний тактовий сигнал шини SPI (Serial Clock)
MISO	D12	—	Вихід веденого / Вхід головного на шині SPI
MOSI	D11	—	Вхід веденого / Вихід головного на шині SPI
RST	D9	—	Лінія апаратного скидання трансивера (Reset)
—	3.3V	VCC	Позитивний потенціал живлення датчика
—	GND	GND	Спільна шина заземлення датчика
—	A0	DATA	Однопровідна цифрова шина передачі даних

На стороні приймача (клієнта) одноплатний комп'ютер Raspberry Pi здійснює апаратне опитування бездротового модуля LoRa через системну шину. Схема міжплатного інтерфейсу наведена на рисунку 1.15.

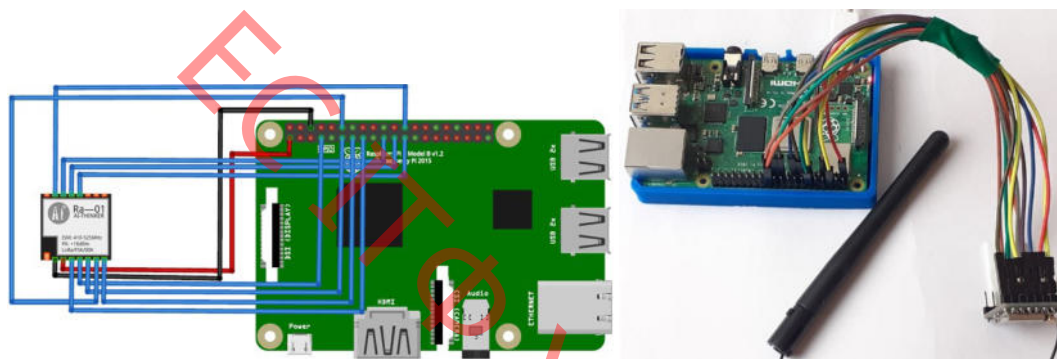


Рисунок 1.15. Схема з'єднань ліній GPIO одноплатного комп'ютера Raspberry Pi з приймальним модулем LoRa [2]

Для забезпечення стабільної фіксації пакетів та обробки логічних рівнів, крім стандартних ліній послідовного периферійного інтерфейсу SPI, задіяні додаткові контакти переривань загального призначення GPIO. Повний розподіл контактів наведено у таблиці 1.3.

Таблиця 1.3. Інтерфейсна таблиця з'єднань модуля LoRa SX1278 з GPIO Raspberry Pi [2].

Вивід комп'ютера Raspberry Pi	Вивід трансивера LoRa SX1278	Функціональне призначення лінії зв'язку
3.3V	3.3V	Живлення цифрової та аналогової частин модуля
Ground	Ground	Потенціал спільної заземлювальної поверхні
GPIO 10	MOSI	Передача даних від головного до веденого пристрою
GPIO 9	MISO	Передача даних від веденого до головного

Вим.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

		пристрою
GPIO 11	SCK	Синхронізація послідовної передачі даних шини SPI
GPIO 8	Nss / Enable	Активація кристала веденого модуля (Chip Select)
GPIO 4	DIO 0	Основна лінія сигналу переривання (RxDone / TxDone)
GPIO 17	DIO 1	Додаткова лінія конфігурації переривань трансивера
GPIO 18	DIO 2	Додатковий цифровий вивід стану внутрішніх регістрів
GPIO 27	DIO 3	Сигнальний вивід контролю стану радіомодема
GPIO 22	RST	Лінія примусового скидання конфігурації мікросхеми

Для візуалізації та глобального моніторингу отриманих даних використовується спеціалізована екосистема хмарного керування Cayenne. Дана IoT-платформа дозволяє здійснювати віддалений контроль мікроконтролерних систем і завантажувати масиви даних датчиків у хмарне сховище з подальшим виведенням параметрів на графічні віджети робочої панелі (рисунок 1.16).

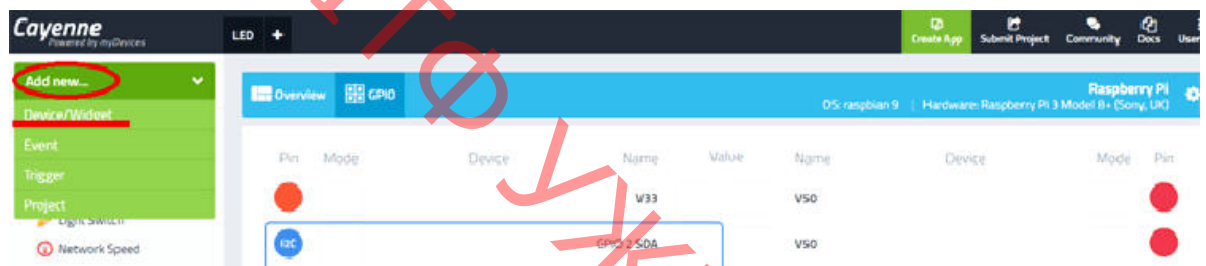


Рисунок 1.16. Користувацький інтерфейс робочої панелі хмарної IoT-платформи Cayenne [2]

1.3.2. Інтеграція модуля LoRa SX1278 із системою на кристалі ESP32

Технологія LoRa, розроблена корпорацією Semtech, забезпечує двонаправлену передачу інформації в енергоефективних мережах далекого радіусу дії. Для створення систем із підвищеною обчислювальною потужністю та проміжним інтернет-шлюзуванням доцільно використовувати зв'язку модуля SX1278 із мікроконтролером ESP32 (рисунок 1.17).

Вим.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

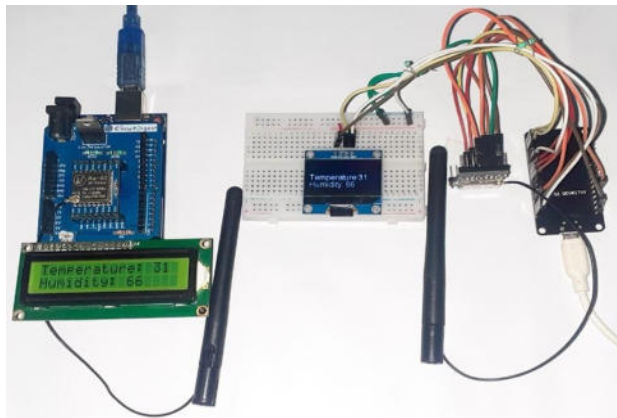


Рисунок 1.17. Макетний зразок комунікаційного вузла на базі SoC ESP32 та трансивера LoRa SX1278 [3]

У даній конфігурації розглядається архітектура, де передавач на базі ESP32 виконує роль клієнта глобальної мережі: через вбудований Wi-Fi інтерфейс та відкриті посилання віддалених серверів (Weather API) система запитує актуальні погодні дані для заданого географічного пункту. Отримані пакети даних виводяться на локальний графічний OLED-дисплей та транслюються через радіоканал LoRa на приймальну сторону. Приймач, побудований на базі зв'язки Arduino Uno та символічного РК-дисплея формату 16x2, фіксує радіопакети та відображає текстову інформацію на екрані.

Схема електричних підключень передавального вузла на базі архітектури ESP32 із підключеними периферійними пристроями наведена на рисунку 1.18.

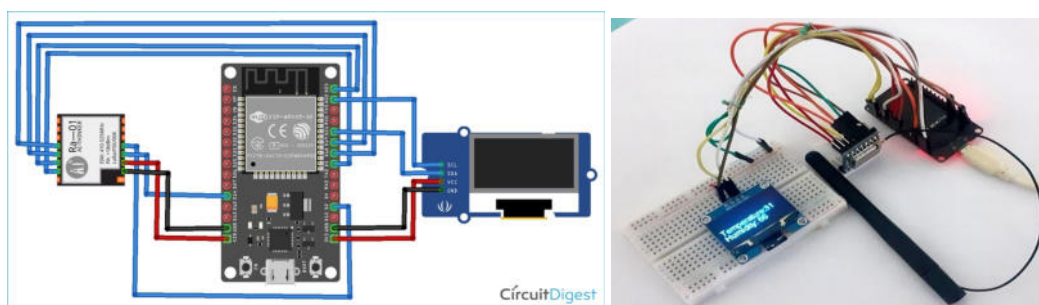


Рисунок 1.18. Схема електрична підключення модуля LoRa SX1278 та OLED-дисплея до мікроконтролера ESP32 [3]

Вим.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

З'єднання між радіочастотним трансивером і мікроконтролером виконується по шині SPI, а для OLED-дисплея задіяна послідовна двопровідна шина I2C. Розподіл всіх ліній зв'язку наведено в таблиці 1.4.

Таблиця 1.4. Конфігурація інтерфейсних з'єднань модуля LoRa SX1278 та OLED-дисплея з системою на кристалі ESP32 [3].

Вивід модуля LoRa SX1278	Вивід мікроконтролера ESP32	Вивід OLED-дисплея	Опис та тип сигналу
3.3V	3.3V	—	Живлення високочастотного трансивера
GND	GND	—	Спільна лінія заземлення схеми
NSS	D5	—	Лінія вибору пристрою SPI (Chip Select)
DIO0	D2	—	Вхід зовнішнього апаратного переривання
SCK	D18	—	Тактова частота послідовної шини SPI
MISO	D19	—	Лінія передачі даних від веденого пристрою
MOSI	D23	—	Лінія передачі даних від головного пристрою
RST	D14	—	Сигнал апаратного скидання внутрішніх регістрів
—	3.3V	VCC	Позитивний потенціал живлення індикатора
—	GND	GND	Спільна шина заземлення індикатора
—	D22	SCL	Тактова лінія послідовної шини I2C (Serial Clock)
—	D21	SDA	Лінія даних послідовної шини I2C (Serial Data)

На стороні приймача для оптимізації конструкції використовується спеціалізована плата розширення — Arduino LoRa Shield. Даний модуль розширення містить інтегрований трансивер SX1278 із робочою частотою 433 МГц та індивідуальний контур стабілізації напруги живлення 3,3 В, виконаний на базі регульованого мікросхемного стабілізатора серії LM317. Щит встановлюється безпосередньо у роз'єми плати Arduino Uno. Його повна принципова схема наведена на рисунку 1.19.

Вим.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

КРБ.ЕС.10314853.01.000 ПЗ

Арк.

29

Після завершення монтажних робіт, прошивки мікроконтролерів та встановлення зв'язку, приймальний вузол на базі Arduino Uno здійснює виведення текстових рядків із параметрами температури та вологості повітря на символний рідкокристалічний індикатор (рисунок 1.21).

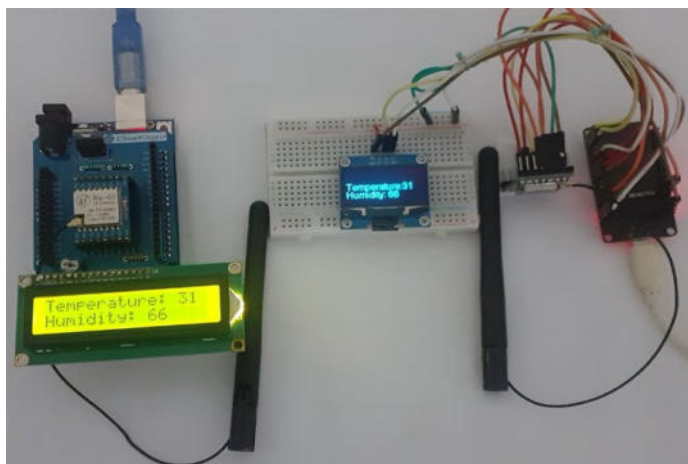


Рисунок 1.21. Робочий макет приймального вузла на базі Arduino Uno та символного РК-дисплея 16x2 [3]

Вим.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

2 ПРОЄКТНО - КОНСТРУКТОРСЬКИЙ РОЗДІЛ

2.1 Розробка структурної схеми електронного пристрою

Електронний пристрій складається з двох функціонально незалежних модулів: вузла мультидатчиків та центрального вузла (хаба) структурна схема приведена на рис. 2.1.

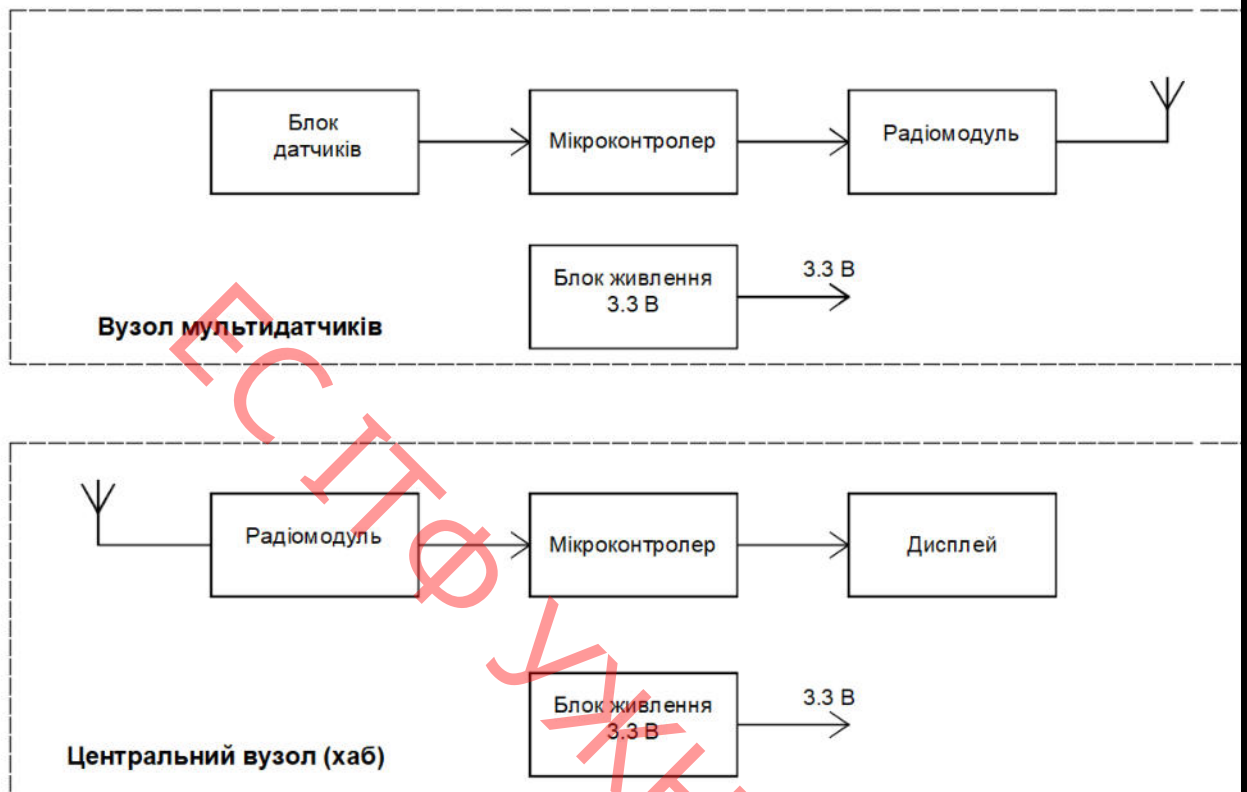


Рисунок 2.1. Схема електрична структурна

2.1.1. Функціональні блоки вузла мультидатчиків:

Блок датчиків: містить датчики вимірювання температури аналогові та цифрові вимірювач параметрів газу.

Мікроконтролер: є ядром передавального вузла. Він виконує циклічне опитування датчиків, приймає дані з цифрових шин, пакує телеметрію у кадр даних і керує трансивером.

Радіомодуль (передавача): приймає від мікроконтролера сформований пакет даних, модулює його високочастотним сигналом і випромінює в ефір через антену.

Вим.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

2.1.2. Функціональні блоки центрального вузла:

Радіомодуль приймача: перебуває в режимі постійного сканування ефіру на заданій частоті. При виявленні сигналу демонтує його та передає цифровий пакет на контролер хабу.

Мікроконтролер (керуючий контролер хабу): перевіряє цілісність отриманого пакета, декодує інформацію та готує її до передачі на вищий рівень.

Дисплей: призначений для відображення отриманих даних від мікроконтролера.

2.1.3. Блок живлення:

Обидва вузли оснащені ідентичними автономними буферними джерелами живлення, що містять:

Li-Ion акумулятор: забезпечує автономність роботи пристрою.

Контролер заряду: відповідає за безпечний алгоритм заряду акумулятора від зовнішнього джерела.

Стабілізатор напруги: знижує та стабілізує напругу акумулятора до фіксованого рівня.

2.2 Апаратне забезпечення електронного пристрою

Arduino Uno

Arduino Uno — це апаратно-програмна платформа для прототипування, виконана на базі одноплатного мікроконтролера. У складі електронних систем вона виконує функції центрального обчислювального та керуючого модуля (див. рис. 2.2 і 2.3). Пристрій забезпечує збирання й обробку даних від датчиків та формування сигналів керування для виконавчих елементів [4, 5].

Архітектура та апаратний склад плати

Архітектуру платформи формують кілька функціональних вузлів та інтерфейсних елементів, ключовими з яких є:

Мікроконтролер ATmega328P: Базовий обчислювальний компонент плати. Це 8-бітний мікроконтролер архітектури AVR RISC, що

Вим.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

безпосередньо виконує компільований програмний код. Його підсистема пам'яті та тактування має такі характеристики:

Flash-пам'ять: 32 КБ (з яких 0.5 КБ зарезервовано під завантажувач *bootloader*) — енергонезалежна пам'ять програм.

SRAM: 2 КБ — статична оперативна пам'ять для збереження тимчасових змінних у процесі виконання програми.

EEPROM: 1 КБ — електрично стираєна програмована ROM для збереження конфігураційних даних, що мають зберігатися після вимкнення живлення.

Тактова частота: 16 МГц (стабілізована зовнішнім кварцовим резонатором).

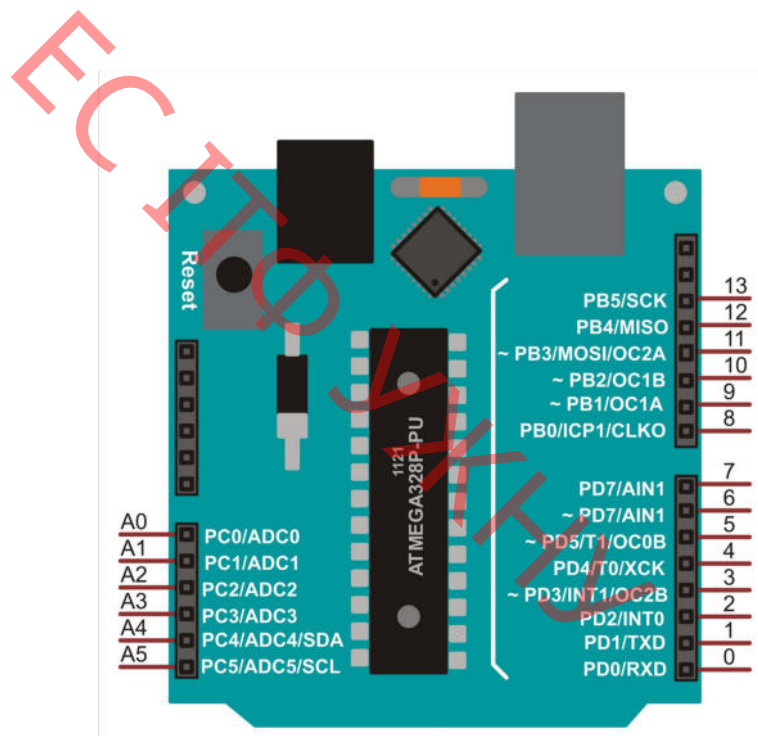


Рисунок 2.2. Вид Arduino Uno [4]

Цифрові лінії вводу/виводу (Pins 0–13): Конфігуровані порти, що функціонують у режимах дискретного входу або виходу. Оперують логічними рівнями V_{IL}/V_{IH} (імітація станів LOW — 0 В та HIGH — 5 В). Максимальний струм на один вивід не повинен перевищувати 40 мА.

Канали ШІМ (PWM): Цифрові виводи 3, 5, 6, 9, 10 та 11 (позначені символом тильди ~). Вони підтримують апаратну широтно-імпульсну

Вим.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

модуляцію, що дозволяє за рахунок зміни коефіцієнта заповнення імпульсів формувати еквівалент аналогового сигналу.

Аналогові входи (Pins A0–A5): Призначені для реєстрації неперервних аналогових сигналів. Інтегрований аналогово-цифровий перетворювач (АЦП) послідовного наближення має розрядність 10 біт. Він квантує вхідну напругу в діапазоні 0...5 В, перетворюючи її у цифровий еквівалент — беззнакове ціле число від 0 до 1023:

$$\text{Digital_Value} = (V_{\text{in}}/V_{\text{ref}} \cdot 1023)$$

Підсистема живлення: Енергозабезпечення плати здійснюється або через інтерфейсний роз'єм USB (5 В), або через коаксіальний роз'єм живлення DC (зовнішнє джерело, рекомендований діапазон: 7–12 В). Вбудовані лінійні стабілізатори формують шини живлення периферії із напругою 5 В та 3.3 В. Для підключення загального провідника передбачено виводи GND. Узагальнені параметри платформи зведено у таблиці 2.1.

Таблиця 2.1. Технічні характеристики мікроконтролерної плати Arduino Uno

Параметр	Значення/опис
Мікроконтролер	ATmega328P (8-бітний AVR)
Робоча напруга (логічний рівень)	5 В
Вхідна напруга живлення (рекомендована)	7–12 В
Цифрові входи/виходи (I/O)	14 (з яких 6 підтримують ШІМ)
Аналогові входи (канали АЦП)	6
Максимальний струм виводу I/O	40 мА (для кожного піна)
Максимальний струм виводу 3.3V	50 мА
Об'єм пам'яті програм (Flash)	32 КБ
Об'єм ОЗП (SRAM)	2 КБ
Об'єм енергонезалежної пам'яті (EEPROM)	1 КБ
Тактова частота	16 МГц

Вим.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

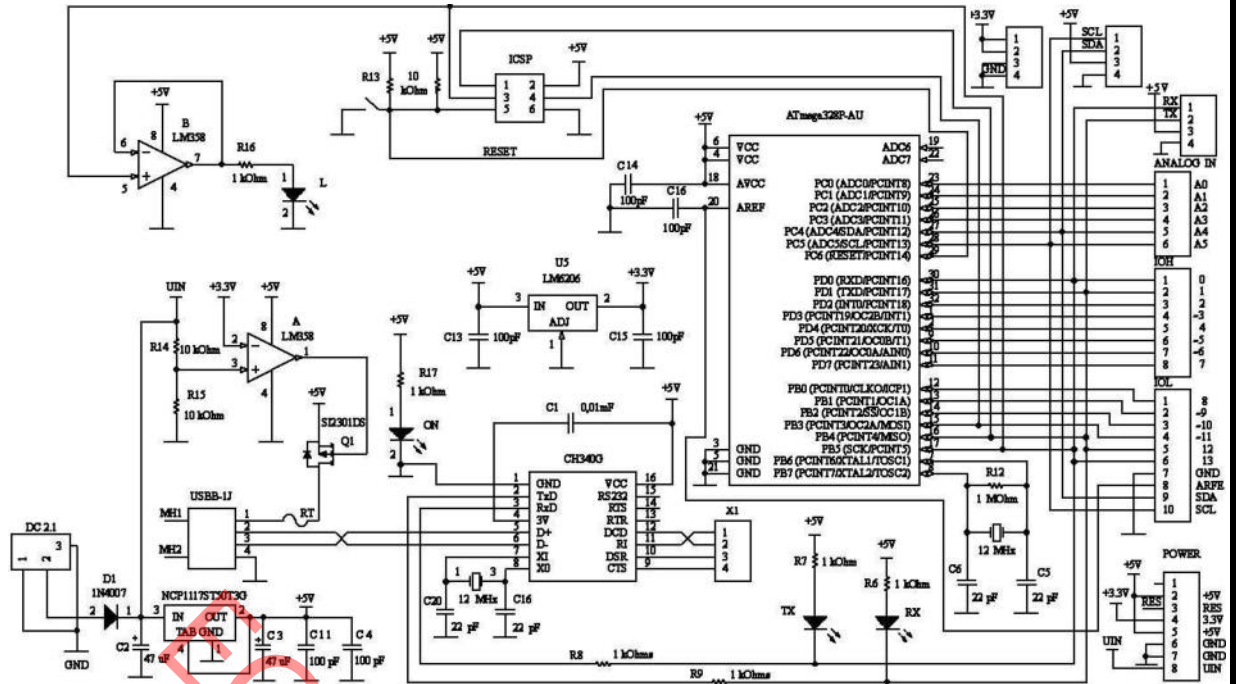


Рисунок 2.3. Arduino Uno схема електрична принципова [4]

Модуль nRF24L01+

nRF24L01+ постачається у двох різних версіях, з яких ви можете вибрати.

Перша версія має антену, вбудовану безпосередньо в друковану плату. Це робить її зручною та компактною, але менша антенна означає, що вона не досягатиме такої великої відстані. З цією версією ви можете надсилати та приймати сигнали на відстані приблизно 100 метрів, якщо використовувати її на вулиці, коли нічого не заважає. Усередині будівель радіус дії стає ще меншим, оскільки стіни та меблі можуть блокувати частину сигналу.

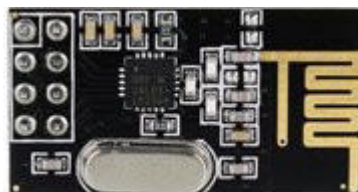


Рисунок 2.4. Модуль PA/LNA nRF24L01+ [6]

Вим.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

Друга версія виглядає інакше, оскільки має роз'єм SMA з антеною-качкою, що стирчить. Але це не єдина відмінність – ця версія також містить мікросхему розширювача діапазону RFX2401C. Ця спеціальна мікросхема поєднує підсилювач потужності (PA), малошумний підсилювач (LNA) та схему перемикавання передачі-прийому. Завдяки цим оновленням ця версія може передавати сигнали набагато далі – до 1000 метрів!

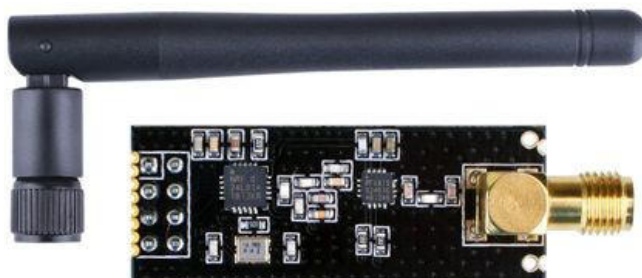


Рисунок 2.5. Схема з'єднань мікросхем драйвера [6]

Незважаючи на ці відмінності, обидві версії повністю взаємозамінні.

PA розшифровується як підсилювач потужності, і він робить саме те, що звучить — підсилює потужність сигналу, що надсилається мікросхемою nRF24L01+. Це робить сигнал сильнішим і допомагає йому поширюватися далі.

LNA розшифровується як малошумний підсилювач, і він працює на приймальному кінці. Коли через антену надходить дуже слабкий сигнал (іноді лише кілька мікрвольт), LNA підсилює його до сильнішого рівня (приблизно від піввольта до одного вольта), з яким можуть працювати решта схем. Частина «низького шуму» важлива, оскільки це означає, що підсилювач підсилює сигнал без додавання значних перешкод або статичних перешкод.

Завдяки спільній роботі обох підсилювачів, модуль може здійснювати зв'язок на набагато більші відстані, ніж базова версія.

Модуль nRF24L01+ здійснює зв'язок, надсилаючи та отримуючи дані на певних частотах, які називаються каналами. Щоб ці модулі могли взаємодіяти один з одним, вони повинні бути налаштовані на один і той самий канал. Ці канали можуть бути будь-де в діапазоні від 2,400 до 2,525 ГГц (або від 2400 до 2525 МГц).

Вим.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

Кожен канал займає лише близько 1 МГц місця в радіоспектрі. Оскільки повний діапазон має ширину 125 МГц, це дає нам 125 різних можливих каналів, розташованих на відстані 1 МГц один від одного.

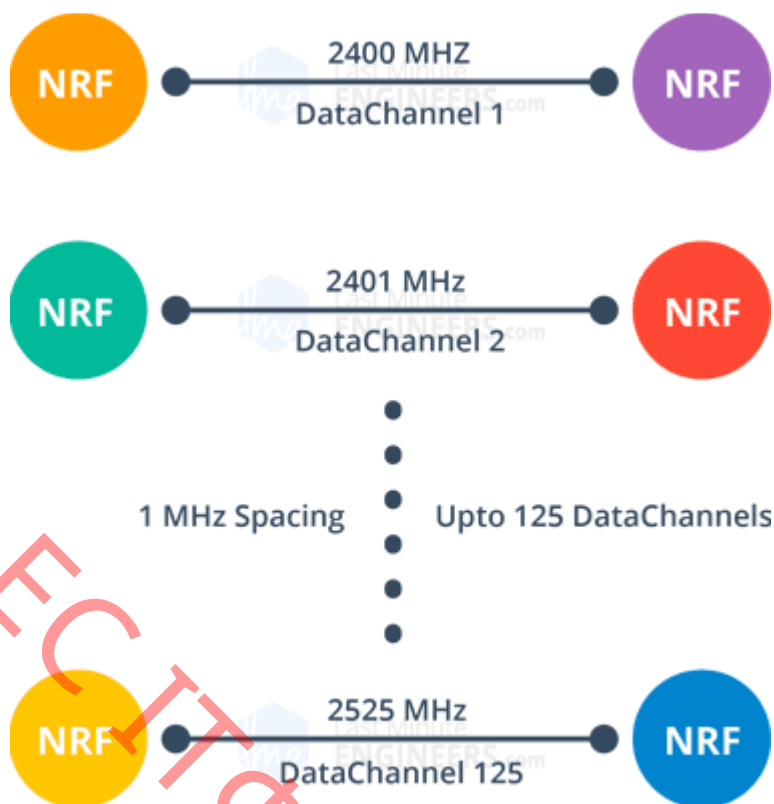


Рисунок 2.6. Схема з'єднань мікросхем драйвера [6]

Це означає, що ви можете мати 125 окремих груп модулів nRF24L01+, що працюють в одній зоні, не заважаючи один одному, оскільки кожна група використовуватиме свій власний канал.

Розширений протокол ShockBurst. nRF24L01+ використовує спеціальний протокол зв'язку під назвою Enhanced ShockBurst™. Цей протокол допомагає забезпечити правильну доставку повідомлень шляхом:

- буферизація пакетів даних (тимчасове зберігання пакетів перед обробкою);
- підтвердження отримання пакетів (щоб відправник знав, що повідомлення отримано);
- автоматичне повторне надсилання втрачених пакетів (для забезпечення надійного зв'язку).

Вим.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

Ці функції роблять бездротовий зв'язок надійнішим, особливо на великих відстанях. Це також спрощує роботу мікроконтролерів (таких як Arduino), оскільки їм не потрібно самотійно обробляти всі ці речі.

Розпіновка модуля nRF24L01+ рис. 2.7.

Давайте розглянемо розташування виводів бездротового комунікаційного модуля nRF24L01+. Кожен вивід має певне призначення, яке допомагає модулю взаємодіяти з вашим Arduino:

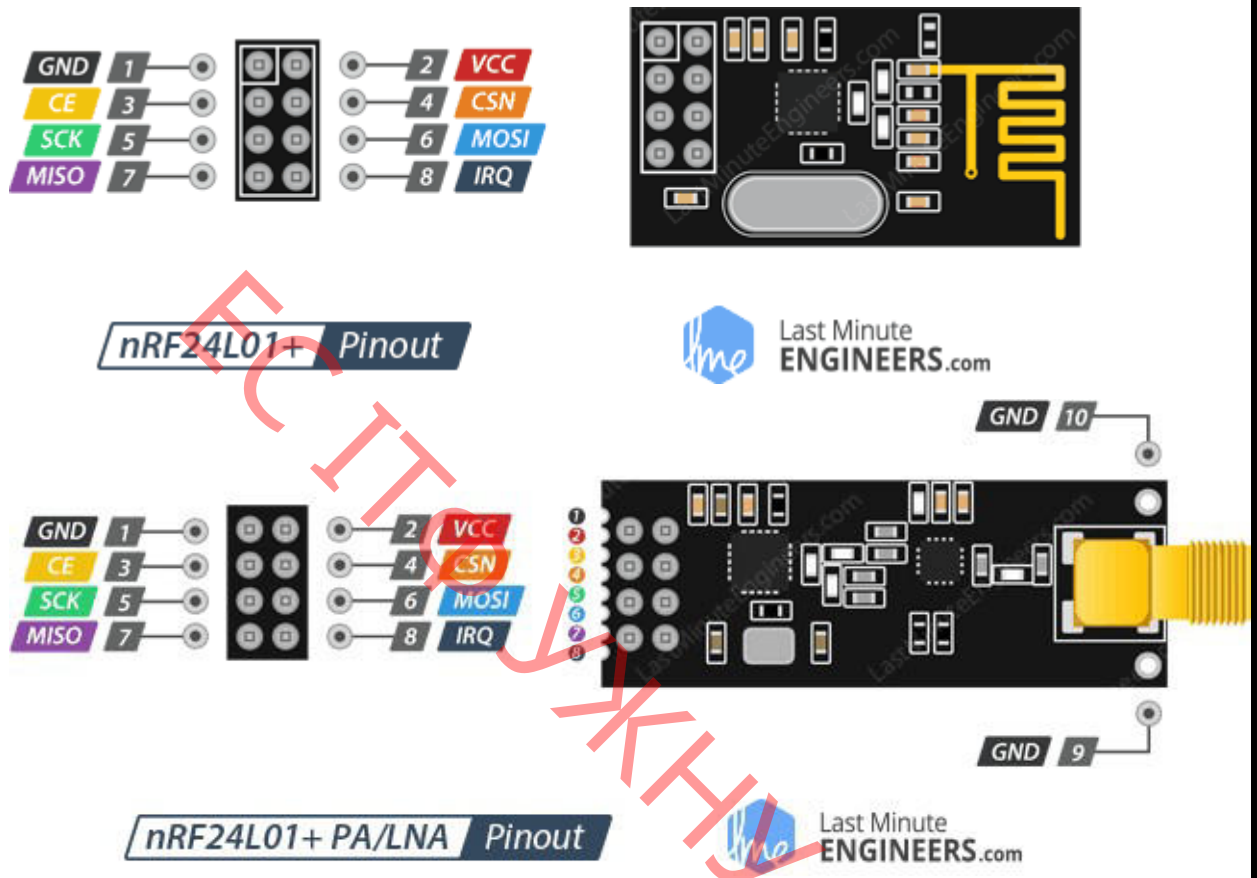


Рисунок 2.7. Розпіновка модуля nRF24L01+ [6]

GND це заземлювальний контакт. Ви можете впізнати його за квадратним маркуванням, яке відрізняє його від інших контактів.

VCC цей контакт живить модуль. Для належної роботи йому потрібно від 1,9 до 3,9 вольт. Підключіть його до виходу 3,3 В вашого Arduino. Ніколи не підключайте його до виводу 5 В, інакше ви можете пошкодити свій модуль!

CE (включення чіпа) є контактом з активним високим рівнем. Цей контакт діє як перемикач для модуля. Коли ви встановлюєте його у високий

Вим.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

рівень, модуль стає активним і може надсилати або отримувати дані (залежно від його конфігурації). Коли ви встановлюєте його у низький рівень, модуль переходить у режим очікування для економії енергії.

CSN (вибір чіпа не передбачено) також є активним низьким контактом. Зазвичай він має високий рівень сигналу (HIGH), але якщо ви хочете, щоб ваш Arduino взаємодівав з модулем, ви встановлюєте його на низький рівень (LOW). Це особливо важливо, коли до вашого Arduino підключено кілька SPI-пристроїв.

SCK (Послідовний тактовий інтерфейс) Вивід отримує імпульси SPI синхронізації від вашого Arduino. Ці імпульси синхронізації допомагають синхронізувати передачу даних.

MOSI (Вихід головного) Вхід підлеглого це SPI-вхід для NRF24L01 від Arduino.

MISO (Головний вхід/Вихід веденого) це вихід SPI з NRF24L01 назад до Arduino.

IRQ (запит на переривання) це вихід переривання з активним низьким рівнем. Цей контакт сповіщає ваш Arduino про щось важливе, наприклад, про отримання або надсилання даних. Модуль сигналізує про це, короткочасно встановлюючи контакт у низький рівень.

Підключення модуля nRF24L01+ до Arduino

Спочатку підключіть контакт VCC модуля до напруги 3,3 В Arduino, а контакт GND – до землі Arduino.

Виводи CSN та CE можна підключити до будь-якого цифрового виводу вашого Arduino – у нашому прикладі ми використовуємо цифровий вивід №8 для CSN та цифровий вивід №9 для CE.

Далі ми підключимо контакти, що використовуються для зв'язку SPI. Оскільки модуль nRF24L01+ повинен швидко передавати дані, він найкраще працює, коли його підключено до апаратних контактів SPI на Arduino. Для плат Arduino UNO ці контакти: цифровий 13 (SCK), 12 (MISO), 11 (MOSI) та 10 (CS).

Контролер заряду TP4056

Вим.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

КРБ.ЕС.10314853.01.000 ПЗ

Арк.

40

TP4056 — це класична, базова мікросхема, вона являє собою повний лінійний зарядний пристрій для одноелементних літій-іонних (Li-Ion) та літій-полімерних (Li-Po) акумуляторів з тепловим регулюванням. На базі цього чіпа будуються систем автономного живлення.

Функціональна архітектура та принцип роботи

Мікросхема працює за стандартним для літєвих акумуляторів двоетапним алгоритмом CC/CV (Constant Current / Constant Voltage):

Режим постійного струму (Constant Current - CC): Якщо напруга на акумуляторі вища за 2.9 В, чіп заряджає його максимальним заданим струмом до 1 А.

Режим постійної напруги (Constant Voltage - CV): Коли напруга на комірці досягає 4.2 В (а це прецизійний поріг з точністю 1%), мікросхема фіксує цю напругу і починає плавно знижувати струм заряду.

Зарядний цикл автоматично завершується, коли струм заряду падає до 10% від початково встановленого значення. Ключові технічні характеристики TP4056 приведені в таблиці 2.2.

Таблиця 2.2. Технічні характеристики TP4056

Параметр	Значення	Примітка
Вхідна напруга V_{CC}	4.5 - 5.5 В	Ідеально підходить для живлення від USB 5 В
Кінцева напруга заряду	4.2 В	Фіксована, з точністю 1%
Максимальний струм заряду I_{max}	1000 мА (1А)	Програмується одним зовнішнім резистором
Тип корпусу	SOP-8 / ESOP-8	Модифікація ESOP-8 має знизу металеву підкладку (Thermal Pad)
Захист від перегріву	Наявний	Знижує струм при температурі кристала понад 145C

Програмування струму заряду

Великою перевагою TP4056 є можливість задавати струм заряду за допомогою всього одного резистора R_{PROG} , який підключається між 2-м піном мікросхеми та заземленням (GND).

Формула розрахунку струму заряду виглядає так:

$$I_{chg} = 1200/R_{PROG}$$

Де струм I_{chg} вказується в Амперах, а опір R_{PROG} — в Омах.

Вим.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

Типові значення для лабораторних робіт:

$R_{\text{PROG}} = 1.2 \text{ кО}$ тоді $I_{\text{chg}} = 1000 \text{ мА}$ (Максимум, типowo для плат-модулів з Китаю).

$R_{\text{PROG}} = 2 \text{ кО}$ тоді $I_{\text{chg}} = 600 \text{ мА}$

$R_{\text{PROG}} = 10 \text{ кО}$ тоді $I_{\text{chg}} = 120 \text{ мА}$ (Для безпечної зарядки маленьких акумуляторів, наприклад, від bluetooth-гарнітур).

Специфіка використання популярних модулів

У практичних проектах рідко розпаюють голий чіп, частіше використовують готові модулі. Вони бувають двох типів:

Без захисту акумулятора (гола TP4056): Має лише вхід, вихід на акумулятор та два світлодіоди (Червоний — «Зарядка», Синій/Зелений — «Заряджено»). Якщо навантаження споживатиме струм далі, чіп не захистить акумулятор від глибокого розряду.

З платою захисту (на базі DW01A та 8205A): Найбільш правильний вибір. Окрім самої TP4056, на платі стоїть контролер захисту та здвоєний MOSFET. Цей вузол відсікає навантаження, якщо акумулятор розрядився нижче 2.4 В, або якщо сталося коротке замикання.

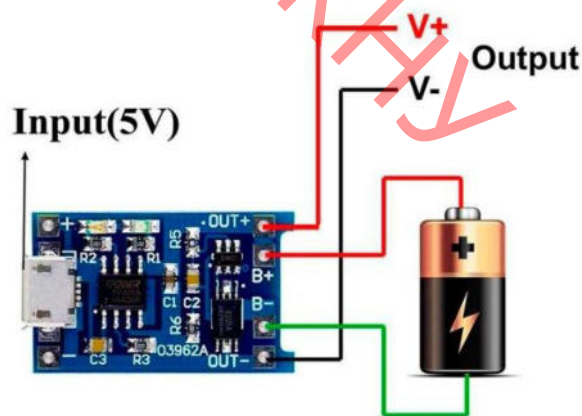


Рисунок 2.8. Контролер заряду TP4056 [7]

ESP32

Архітектура та обчислювальне ядро

Вим.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

В основі класичного чіпа ESP32 лежить високопродуктивний процесор Xtensa Dual-Core 32-bit LX6.

Обчислювальна потужність: на відміну від 16 МГц в Arduino Uno, ESP32 працює на тактовій частоті до 240 МГц. Продуктивність сягає близько 600 DMIPS, що дозволяє виконувати криптографічні алгоритми, цифрову обробку сигналів (DSP) та навіть базові завдання штучного інтелекту (нейромережі).

Асиметрична двоядерність (Dual-Core): Наявність двох ядер (Core 0 та Core 1) дозволяє розподіляти завдання на рівні операційної системи реального часу (RTOS). Зазвичай Core 0 повністю виділяється під обслуговування бездротових стеків (Wi-Fi/Bluetooth), а Core 1 залишається абсолютно вільним для виконання користувацького прикладного коду. Це унеможливорює затримки в роботі периферії через мережеву активність.

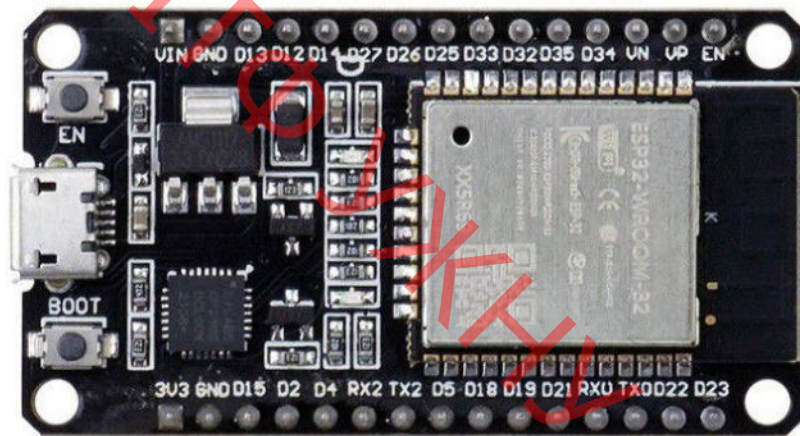


Рисунок 2.9. Схема з'єднань мікросхем драйвера [8]

Підсистема пам'яті:

SRAM: Вбудовано 520 КБ (для порівняння, в ATmega328P було лише 2 КБ). Цього достатньо для тримання великих мережевих буферів.

Flash-пам'ять: Зовнішня, підключається по високошвидкісній шині SPI. Зазвичай модулі постачаються з 4 МБ, 8 МБ або 16 МБ Flash.

Бездротові інтерфейси та радіотракт

Головна перевага ESP32 — інтегрований у кристал радіочастотний тракт (RF Front-End), що працює в ISM-діапазоні 2.4 ГГц.

Вим.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

Wi-Fi (IEEE 802.11 b/g/n): Підтримує швидкість передачі даних до 150 Мбіт/с. Може працювати в режимах:

Station (STA): Підключення до існуючої Wi-Fi мережі (роутера) для виходу в інтернет.

Access Point (AP): Створення власної Wi-Fi мережі (до модуля можна підключитися зі смартфона безпосередньо).

Протокол ESP-NOW: Фірмовий низькорівневий протокол зв'язку «точка-точка» без підключення до роутера. Забезпечує передачу пакетів із мінімальною затримкою (< 10 мс) та високою дальністю (до 200–400 метрів на відкритому просторі).

Bluetooth (v4.2 BR/EDR та BLE): Підтримує як класичний Bluetooth (для передачі аудіо чи великих потоків даних), так і Bluetooth Low Energy (BLE), що є критично важливим для енергоефективних датчиків, сумісних зі смартфонами.

Периферія та апаратні блоки

ESP32 має надзвичайно багатий набір вбудованих апаратних модулів, які виведені на GPIO (General Purpose Input/Output) піни плати розробника.

АЦП (ADC) та ЦАП (DAC): На борту є два 12-бітні аналогово-цифрові перетворювачі на 18 каналів (дозволяють зчитувати напругу з точністю до мілівольтів) та два 8-бітні цифрово-аналогові перетворювачі (ЦАП) для генерації чистого аналогового сигналу (наприклад, звуку).

Ємнісні сенсори (Touch Pins): 10 виводів мають апаратні контролери ємності, що дозволяє створювати сенсорні кнопки без використання зовнішніх мікросхем.

Апаратні інтерфейси: 3 канали UART, 3 канали SPI, 2 канали I2C, а також I2S (для цифрового звуку) та CAN-шина (для автомобільної/промислової автоматики).

ШІМ (PWM): 16 незалежних каналів із можливістю точного налаштування частоти та розрядності скважності (блок LEDC).

Енергоменеджмент (Режими енергозбереження)

Вим.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

КРБ.ЕС.10314853.01.000 ПЗ

Арк.

44

Оскільки ви розробляєте проект з економією заряду, особливу увагу слід звернути на архітектуру споживання ESP32. Чіп має кілька режимів:

Active Mode (Активний режим): Працюють обидва ядра, Wi-Fi та Bluetooth увімкнені. Споживання струму: 160...260 мА. Це плата за високу обчислювальну потужність.

Light Sleep (Легкий сон): Цифрова периферія та ядра зупиняють тактування, але стан RAM зберігається. Wi-Fi стек підтримує зв'язок за таймерами. Споживання: ≈ 0.8 мА.

Deep Sleep (Глибокий сон): Процесорні ядра, пам'ять SRAM та радіомодулі повністю знеструмлюються. Працює лише енергонезалежний співпроцесор ультранизького споживання (ULP — Ultra Low Power co-processor) та RTC-таймер. Споживання падає до 10...15 μ А.

2.3 Розробка принципової схеми електронного пристрою

На основі структурної схеми і підібраних елементів розробимо принципову схему. На ній відокремимо два основні блоки – блок збору і передачі та блок прийому і обробки. Ці конструктивні елементи відтворять основну задачу проекту – розробка електронного пристрою для реалізації каналу бездротового зв'язку. Принципова схема пристрою приведена на рис. 2.10.

Вим.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

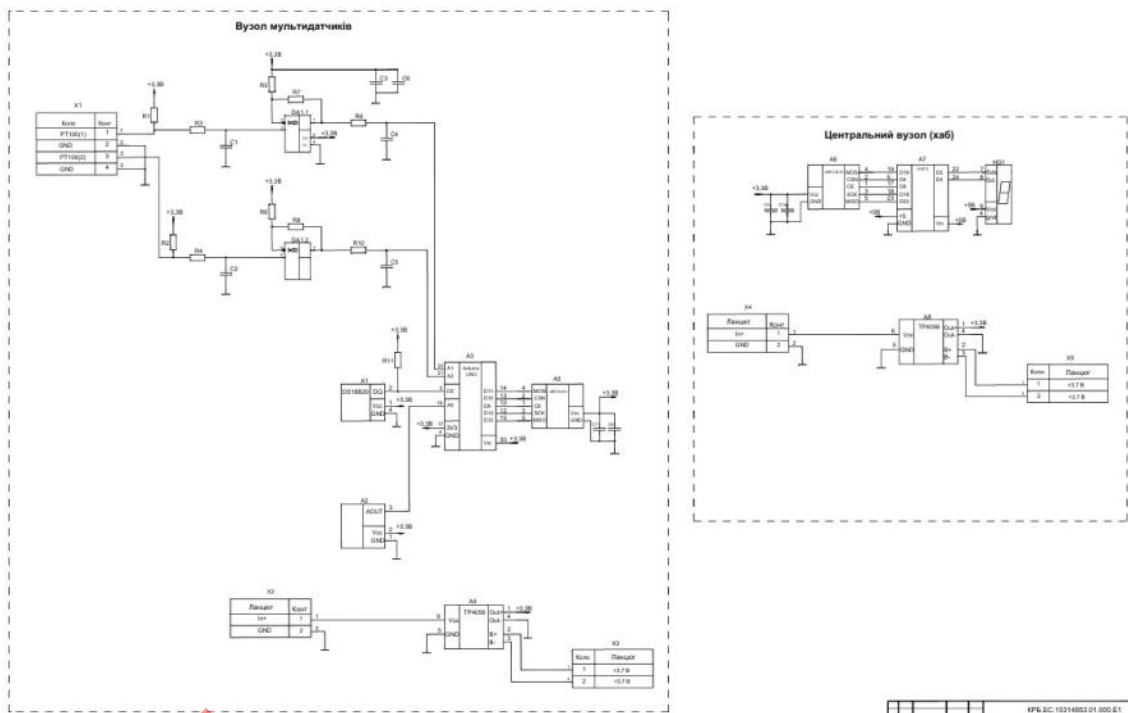


Рисунок 2.10. Схема електрична принципова розробленого пристрою

2.4 Розрахунки елементів схеми

Відповідно до розробленої архітектури, електронний пристрій складається з двох функціонально незалежних модулів: Вузла мультидатчиків (передавача) та Центрального вузла (хаба).

Функціональні блоки вузла мультидатчиків:

- Блок первинних аналогових перетворювачів (Pt100): містить два платинові терморезистори, опір яких змінюється залежно від температури за лінійним законом.
- Блок нормалізуючих вимірювальних підсилювачів (DA1.1, DA1.2): виконаний на базі прецизійних операційних підсилювачів. Основна функція каскаду — перетворення малої зміни опору датчика Pt100 у пропорційну зміну напруги в діапазоні 0...3.3 В для коректної обробки вбудованим АЦП.
- Блок цифрових датчиків (DS18B20, AQ1): здійснює пряме перетворення фізичних величин (температури навколишнього середовища, параметрів газу) у цифровий код і передає його на мікроконтролер через послідовні інтерфейси, 1-Wire.

Вим.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

- Мікроконтролер (A3): є ядром передавального вузла. Він виконує циклічне опитування вбудованого АЦП (зчитування даних з ОП), приймає дані з цифрових шин, здійснює програмну фільтрацію завад, пакує телеметрію у кадр даних і керує трансивером.

- Радіотрансивер (A5): приймає від мікроконтролера по шині SPI сформований пакет даних, модулює його високочастотним сигналом і випромінює в ефір через антену.

Функціональні блоки центрального вузла:

- Радіотрансивер приймача (A6): перебуває в режимі постійного сканування ефіру на заданій частоті. При виявленні сигналу демонтує його та передає цифровий пакет на контролер хабу по шині SPI.

- Керуючий контролер хабу (A7): перевіряє цілісність отриманого пакета (контрольна сума CRC), декодує інформацію та готує її до передачі на вищій рівень [9, 10].

- Інтерфейс зв'язку з ПК: реалізований на базі перетворювача UART-USB, забезпечує передачу отриманої телеметрії на персональний комп'ютер чи сервер для візуалізації на дисплеї, або збереження в базі даних.

Підсистема живлення:

Обидва вузли оснащені ідентичними автономними буферними джерелами живлення, що містять:

- Li-Ion акумулятор (3.7 В): забезпечує автономність роботи пристрою.
- Контролер заряду (A4, A8 на базі мікросхеми TP4056): відповідає за безпечний алгоритм заряду акумулятора від зовнішнього джерела 5 В (наприклад, USB) та захищає його від глибокого розряду.
- LDO-стабілізатор напруги: знижує та стабілізує напругу акумулятора до фіксованого рівня +3.3 В, необхідного для прецизійної роботи АЦП, мікроконтролерів та радіомодулів».

Спосіб підключення RT100 (2-провідний)

У цій конструкції RT100 підключається за двопровідною конфігурацією.

Оскільки опір підвідного дроту відносно малий порівняно із системним шумом, пріоритет надавався простоті та стабільності.

Вим.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

КРБ.ЕС.10314853.01.000 ПЗ

Арк.

47

Датчики РТ100 зазвичай підтримують [10, 11]:

- 2-провідний
- 3-провідний
- 4-провідний

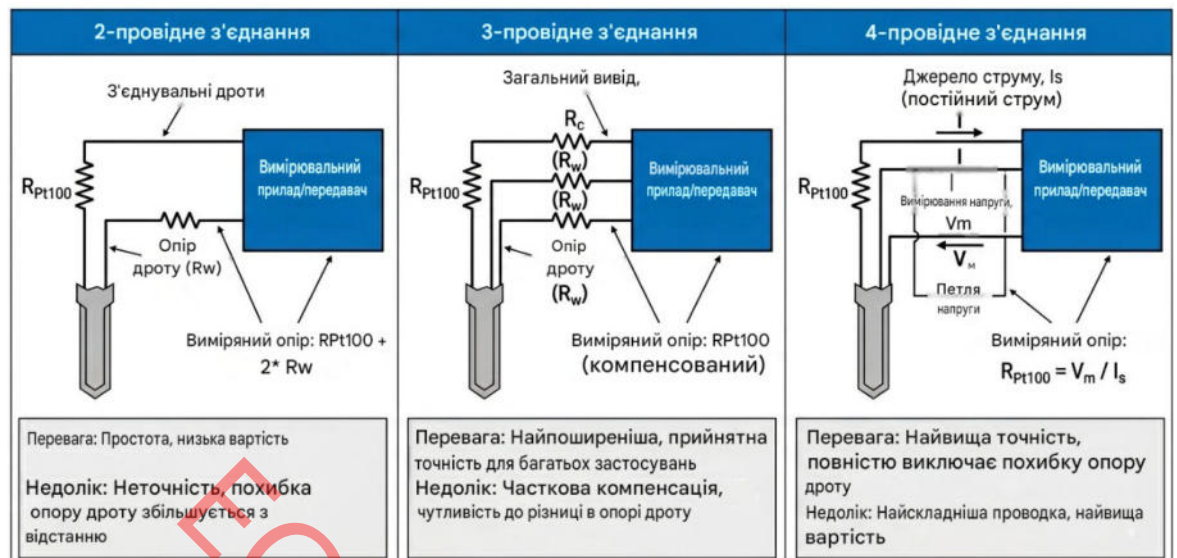


Рисунок 2.11. Порівняння 2-х, 3-х, 4-х, провідних з'єднань РТ100

Двопровідний метод є найпростішим, але опір виводу враховується у вимірюваному значенні.

У цій конструкції було використано 2-провідний метод з наступних причин:

- Коротка довжина кабелю
- Дуже малий опір виводу
- Простіша структура схеми

Враховуючи цільовий діапазон температур (0°C – 200°C) та необхідну точність, двопровідний метод забезпечує достатню практичну продуктивність.

Для вищої точності або довших кабелів датчика можуть знадобитися 3- або 4-провідні конфігурації. Діапазон вхідної напруги табл. 2.3.

Таблиця 2.3. Опір РТ100 змінюється з температурою, генеруючи такі вхідні напруги:

Вим.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

Температура	Опір	Вхідна напруга
0°C	100 Ом	0,116 В
150°C	157 Ом	0,179 В
200°C	176 Ом	0,199 В

Вхідний сигнал дуже малий (приблизно 0,1–0,2 В), що ускладнює повне використання вхідного діапазону АЦП мікроконтролера (0–3,3 В).

Тому посилення необхідне.

Вхідну напругу можна виразити як:

$$V_{in} = 3.3 \times \frac{R_{PT100}}{R_{REF} + R_{PT100}}$$

Конструкція операційного підсилювача з коефіцієнтом посилення

Використовувався неінвертуючий підсилювач.

Рівняння посилення:

$$G = 1 + \frac{R_2}{R_1}$$

R1 = 10 кОм R2 = 130 кОм

Отже:

$$G = 1 + \frac{130k}{10k} = 14$$

Це посилення розширює вхідний сигнал у діапазон, придатний для АЦП мікроконтролера.

Використаний операційний підсилювач: TLV9062. Діапазон вихідної напруги табл. 2.4.

Таблиця 2.4. Діапазон вихідної напруги з вирашем 14:

Вим.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

Температура	Вхідна напруга	Вихідна напруга
0°C	0,116 В	1,62 В
150°C	0,179 В	2,50 В
200°C	0,199 В	2,78 В

Цей діапазон вихідних сигналів безпечно вписується в діапазон вхідного сигналу АЦП мікроконтролера (0–3,3 В), залишаючи достатньо місця для уникнення насичення.

Конструкція RC-фільтра

Оскільки сигнал РТ100 дуже малий, необхідна належна фільтрація.

У цій конструкції застосовується RC-фільтрація як на вході, так і на виході:

Вхідний фільтр: 100 Ом + 10 нФ

Вихідний фільтр: 100 Ом + 10 нФ

Гранична частота:

$$f_c = \frac{1}{2\pi RC}$$

Підставляємо значення:

$$f_c = \frac{1}{2\pi \times 100\Omega \times 10nF} = 159kHz$$

Отже, високочастотний шум вище приблизно 159 кГц починає згасати.

На основі вищезазначених проектних специфікацій було розроблено схему.

Схематичне проектування

Спочатку планований LM358 був замінений на TLV9062, оскільки він був легкодоступний. Схема приймає два входи РТ100 та підсилює їх незалежно, перш ніж надсилати їх на АЦП мікроконтролера. Обидва канали використовують однакову структуру для стабільного порівняння температур.

Вим.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

УНКУУЖТТЭС

Вим.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

КРБ.ЕС.10314853.01.000 ПЗ

Арк.

51

ВИСНОВКИ

У кваліфікаційній бакалаврській роботі успішно вирішено актуальне науково-практичне завдання з проектування та дослідження електронного пристрою для реалізації завадостійкого каналу бездротового зв'язку. Основні результати та висновки роботи полягають у наступному: проведено комплексний аналіз сучасних стандартів бездротового зв'язку короткого та далекого радіусу дії (Bluetooth, Wi-Fi, ZigBee, LoRa, GSM). Визначено, що для локальних автономних систем збору даних оптимальними є рішення, що функціонують у безліцензійному ISM-діапазоні та мають низьку питому вартість компонентів. Обґрунтовано вибір сучасної елементної бази: як центральне обчислювальне ядро застосовано високоефективну систему на кристалі серії ESP32/ESP8266, що має апаратно інтегровані стеки протоколів, низьке енергоспоживання у режимах глибокого сну (Deep Sleep) та розвинену систему периферійних інтерфейсів (UART, SPI, I2C, ADC). Розроблено структурну та принципову електричну схеми пристрою. Інтегровано вузол автономного живлення на базі Li-Ion акумулятора із захисними ланцюгами та контролером заряду TP4056 через інтерфейс MicroUSB, що забезпечує тривалу працездатність пристрою в польових або промислових умовах. Реалізовано схеми високочастотної фільтрації завад по лініях живлення та узгодження імпедансу антени, що дозволило підвищити завадостійкість напівдуплексного каналу зв'язку в умовах електромагнітних збурень. Створена архітектура електронного пристрою продемонструвала високу гнучкість, масштабованість та економічну доцільність, що дозволяє рекомендувати її для інтеграції у системи «розумний будинок» та розподілені мережі екологічного чи промислового моніторингу.

Таким чином, спроектований електронний пристрій повністю відповідає вимогам виданого технічного завдання.

Вим.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

КРБ.ЕС.10314853.01.000 ПЗ

Арк.

52

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Wireless Communication Module Affordable Ones and Applications [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://www.pcbonline.com/blog/wireless-communication-modules.html>
2. Wireless Communication between Arduino & Raspberry Pi using LoRa Module SX1278 [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://iotdesignpro.com/projects/wireless-communication-between-arduino-and-raspberry-pi-using-lora-module-sx1278>
3. Interfacing SX1278 LoRa Module with ESP32 [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://circuitdigest.com/microcontroller-projects/interfacing-sx1278-lora-module-with-esp32>
4. Schematic of arduino uno [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://duino4projects.com/schematic-of-arduino-uno>
5. Воробієнко П. П., Нікітюк Л. А., Резніченко В. А. Телекомунікаційні мережі: Підручник для вузів. — К.: Центр навчальної літератури, 2018. — 640 с.
6. nRF24L01 Single Chip 2.4GHz Transceiver Product Specification [Електронний ресурс]. – Режим доступу: https://www.mouser.com/datasheet/2/297/nRF24L01_Product_Specification_v2_0-9199.pdf
7. Контролер заряду TP4056 MicroUSB для 1S Li-Ion акумуляторів (без захисту) [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://hobbymania.com.ua/ru/p-7296-kontroler-zaryadu-tp4056-microusb-dlya-1s-li>
8. ESP32 Development Board [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://www.antoniadis.com.cy/en/stem-robotics-programming/esp32esp8266-boards/esp32-development-board>

Вим.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

КРБ.ЕС.10314853.01.000 ПЗ

Арк.

53

9. Гніліцький В. В., Свіридов А. П. Проектування бездротових сенсорних мереж та систем моніторингу: Навчальний посібник. — Харків: ХНУРЕ, 2021. — 184 с.

10. Faludi R. Building Wireless Sensor Networks: with ZigBee, XBee, Arduino, and Processing. — Sebastopol: O'Reilly Media, 2011. — 320 p.

11. PT100 Temperature Measurement AFE (Analog Front End) Design [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://c9sys.com/pt100-adc-analog-front-end-design-en/>

12. Шпонько Д., Заяць Т. Проектування енергоефективного електронного пристрою для реалізації каналу бездротового зв'язку дальнього радіусу дії / Д.А. Шпонько, Т.М. Заяць // Modern Science, Economy and Digital Innovation: Collection of Scientific Papers with Proceedings of the 5th International Scientific and Practical Conference, Bucharest, Romania, June 10-12, 2026. International Scientific Unity, 2026. С. 775–777.

ДЛЯ ДОКУМЕНТУ

Вим.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

ДОДАТКИ

КРЕДИТНО-РАХУНКОВИ

Вим.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

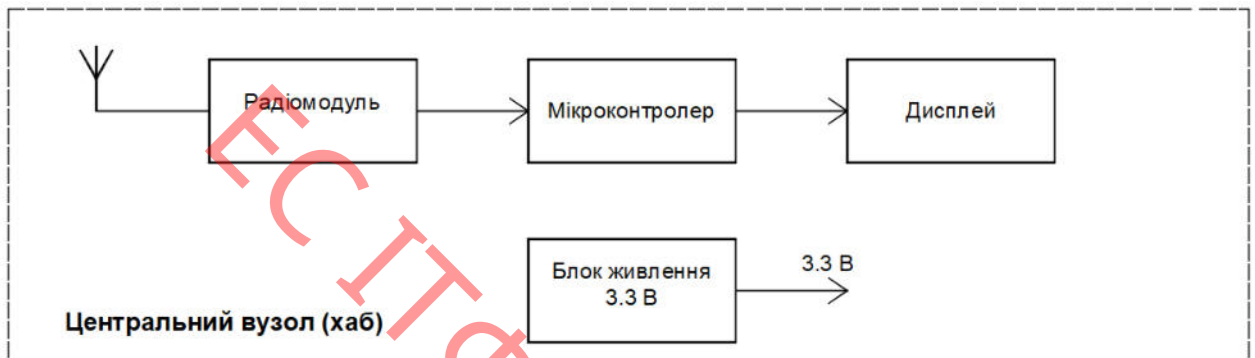
КРБ.ЕС.10314853.01.000 ПЗ

Арк.

55

Додаток А

Схема електрична структурна



Вим.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

КРБ.ЕС.10314853.01.000 ПЗ

Арк.

56

