

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

МАГІСТЕРСЬКА КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

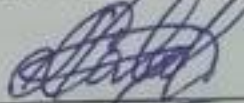
на тему:

**КОМП'ЮТЕРНА СИСТЕМА МОНІТОРИНГУ ПОГОДНИХ
УМОВ З ВИКОРИСТАННЯМ БЕЗПРОВІДНИХ ІНТЕРФЕЙСІВ**

Виконав: студент 2 курсу, групи 1КІ-24м
спеціальності 123 — «Комп'ютерна
інженерія»

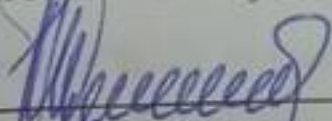
 Тичина Б. Р.

Керівник: к.т.н., доц. каф. ОТ

 Савицька Л. А.

«12» 12 2025 р.

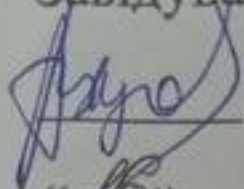
Опонент: к.т.н., доц. каф. ПЗ

 Рейда О. М.

«12» 12 2025 р.

Допущено до захисту

Завідувач кафедри ОТ

 д.т.н., проф. Азаров О. Д.

«16» 12 2025 р.

ВНТУ 2025

ВІННИЦЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

Факультет інформаційних технологій та комп'ютерної інженерії

Кафедра обчислювальної техніки

Галузь знань — Інформаційні технології

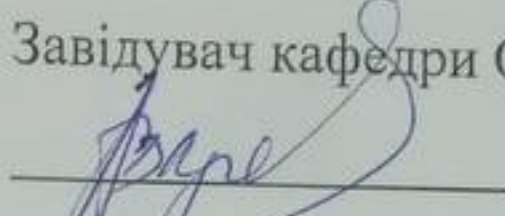
Освітній рівень — магістр

Спеціальність — 123 Комп'ютерна інженерія

Освітньо-професійна програма — Комп'ютерна інженерія

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри ОТ, д.т.н., проф.

 Азаров О. Д.

« 25 » вересня 2025 року

ЗАВДАННЯ

НА МАГІСТЕРСЬКУ КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ

студенту Тичині Б. Р.

1 Тема роботи «Комп'ютерна система моніторингу погодних умов з використанням безпроводних інтерфейсів», керівник роботи Савицька Л. А. к.т.н., доцент, затверджено наказом вищого навчального закладу від 24.09.25 року № 313.

2 Строк подання студентом роботи 4.12.2025.

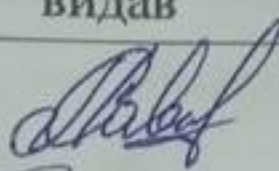
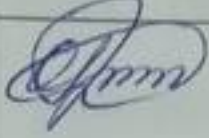
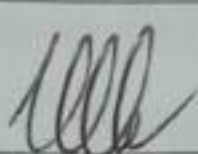
3 Вихідні дані до роботи: призначення — апаратно-програмна платформа для моніторингу погоди; мова програмування C++; бібліотеки для взаємодії з мережевими модулями та датчиками, середовище розробки Arduino IDE; живлення від зовнішнього джерела постійної напруги.

4 Зміст текстової частини (перелік питань, які потрібно розробити): вступ, аналіз мережі та огляд існуючих рішень, методи, моделі та алгоритми функціонування, проектування та розробка апаратно-програмного комплексу, економічна частина.

5 Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень): технічне завдання, функціональна схема, зовнішній вигляд обладнання, лістинг контролера передавача, лістинг контролера приймача.

6 Консультанти розділів роботи наведені в таблиці 1.

Таблиця 1 — Консультанти роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
1-3	Савицька Людмила Анатоліївна к.т.н., доцент кафедри ОТ		
4	Ратушняк Ольга Георгіївна к.т.н., доцент кафедри ЕПВМ		
Нормо-контроль	Швець Сергій Ілліч		

7 Дата видачі завдання 25.09.2025

8 Календарний план виконання приведений в таблиці 2.

Таблиця 2 — Календарний план

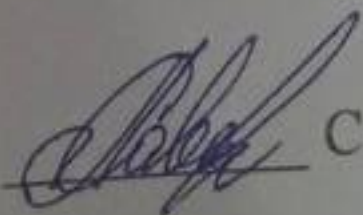
№ з/п	Назва етапів дипломної роботи	Термін виконання		Примітки
		початок	закінчення	
1	Розробка та затвердження завдання на виконання МКР	25.09.2025	26.09.2025	Виконано
2	Огляд літератури за темою роботи	27.09.2025	10.10.2025	Виконано
3	Складання календарного плану МКР	11.10.2025	12.10.2025	Виконано
4	Аналіз предметної області	13.10.2025	17.10.2025	Виконано
5	Розробка проєктних рішень	18.10.2025	27.10.2025	Виконано
6	Моделювання та конструювання	28.10.2025	10.11.2025	Виконано
7	Кодування пристрою	11.11.2025	20.11.2025	Виконано
8	Розробка економічної частини	21.11.2025	25.11.2025	Виконано
9	Оформлення МКР та презентації	26.11.2025	30.11.2025	Виконано
10	Попередній захист			
11	Захист кваліфікаційної роботи			

Студент



Тичина Б. Р.

Керівник роботи



Савицька Л. А.

АНОТАЦІЯ

УДК 004.738.5

Тичина Б. Р. Комп'ютерна система моніторингу погодних умов з використанням безпроводних інтерфейсів. Магістерська кваліфікаційна робота зі спеціальності 123 — Комп'ютерна інженерія. — Вінниця: ВНТУ, 2025 — 113 с. На укр. мові. Бібліогр.: 24 назв; рис.: 32; табл.: 10.

У магістерській кваліфікаційній роботі розглянуто принципи побудови комп'ютерної системи моніторингу погодних умов на базі технологій Інтернету речей із використанням бездротового інтерфейсу LoRaWAN. Проведено аналіз сучасних IoT-рішень у сфері метеорологічного моніторингу, визначено їх переваги та недоліки, а також обґрунтовано доцільність застосування мереж LPWAN для створення автономних метеорологічних станцій з низьким енергоспоживанням.

У роботі досліджено методи збору, передачі та обробки метеорологічних даних за умов наявності шумів, похибок сенсорів і втрат пакетів. Запропоновано використання фільтра Калмана для фільтрації вимірювань, STL-декомпозиції для аналізу часових рядів і статистичної моделі ARIMA для короткострокового прогнозування погодних параметрів. Розроблено структурну та функціональну схеми системи, визначено алгоритми функціонування сенсорних вузлів і серверної частини, а також оцінено економічну ефективність запропонованого рішення.

Результати роботи можуть бути використані для створення автономних метеорологічних станцій у сільському господарстві, екологічному моніторингу та системах розумної інфраструктури, а також у навчальному процесі підготовки фахівців у галузі комп'ютерної інженерії та IoT-технологій.

Ключові слова: Інтернет речей, LoRaWAN, метеорологічний моніторинг, IoT-система, бездротові сенсорні мережі, обробка часових рядів, прогнозування погоди.

ABSTRACT

UDC 004.738.5

Tychyna B. R. A computer system for monitoring weather conditions using wireless interfaces. Master's qualification work in the specialty 123 — Computer Engineering. — Vinnytsia: VNTU, 2025 — 113 p. In Ukrainian. Bibliography: 24 titles; Fig.: 32; Table: 10.

The master's qualification work considers the principles of building a computer system for monitoring weather conditions based on Internet of Things technologies using the LoRaWAN wireless interface. An analysis of modern IoT solutions in the field of meteorological monitoring was conducted, their advantages and disadvantages were identified, and the feasibility of using LPWAN networks to create autonomous meteorological stations with low energy consumption was substantiated.

The work investigates methods for collecting, transmitting and processing meteorological data in the presence of noise, sensor errors and packet losses. The use of the Kalman filter for filtering measurements, STL decomposition for time series analysis and the ARIMA statistical model for short-term forecasting of weather parameters is proposed. The structural and functional scheme of the system is developed, the algorithms for the functioning of sensor nodes and the server part are determined, and the economic efficiency of the proposed solution is assessed.

The results of the work can be used to create autonomous meteorological stations in agriculture, environmental monitoring and smart infrastructure systems, as well as in the educational process of training specialists in the field of computer engineering and IoT technologies.

Keywords: Internet of Things, LoRaWAN, meteorological monitoring, IoT system, wireless sensor networks, time series processing, weather forecasting.

ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ

IoT	— Internet of Things
LoRaWAN	— Long Range Wide Area Network
LPWAN	— Low-Power Wide Area Network
M2M	— Machine-to-Machine
TTN	— The Things Network
MCU	— Microcontroller Unit
API	— Application Programming Interface
JSON	— JavaScript Object Notation
MQTT	— Message Queuing Telemetry Transport
HTTP	— HyperText Transfer Protocol
I2C	— Inter-Integrated Circuit
MISO	— Master In Slave Out
MOSI	— Master Out Slave In
NSS	— Slave Select
SCK	— Serial Clock
SPI	— Serial Peripheral Interface
TTN	— The Things Network
UART	— Universal asynchronous receiver/transmitter

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ.....	6
ЗМІСТ	7
ВСТУП.....	9
1 Аналіз мереж та огляд існуючих рішень	12
1.1 Аналіз безпроводних мереж	12
1.2 Переваги обраної мережі.....	14
1.3 Існуючі рішення на ринку	16
1.4 Вимоги до системи.....	29
2 Методи, моделі та алгоритми функціонування	32
2.1 Методи опрацювання сигналів	32
2.2 Переваги обраних методів.....	46
2.3 Алгоритми роботи.....	48
3 Проектування та розробка апаратно-програмного комплексу.....	50
3.1 Вибір електронних компонентів.....	50
3.2 Підключення компонентів	71
3.3 Програмування компонентів.....	76
4 Економічна частина	79
4.1 Оцінювання комерційного потенціалу розробки	79
4.2 Прогнозування витрат на виконання науково-дослідної роботи....	84
4.3 Розрахунок економічної ефективності науково-технічної розробки	93
4.4 Розрахунок ефективності вкладених інвестицій та періоду їх окупності	94
ВИСНОВКИ.....	98
ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ.....	100
ДОДАТОК А Технічне завдання	103
ДОДАТОК Б Протокол перевірки кваліфікаційної роботи.....	107
ДОДАТОК В Алгоритм роботи передавача	108
ДОДАТОК Г Алгоритм роботи приймача.....	109
ДОДАТОК Д Лістинг передавача.....	110

ДОДАТОК Е Лістинг роботи приймача	112
---	-----

ВСТУП

Актуальність теми дослідження полягає в тому, що в умовах розвитку Інтернету речей (IoT), цифровізації інженерних систем та зростання потреби у точному й оперативному отриманні метеорологічної інформації особливого значення набувають автоматизовані комп'ютерні системи моніторингу погодних умов. Такі системи широко застосовуються у сільському господарстві, енергетиці, транспорті, екологічному моніторингу та міській інфраструктурі. Водночас традиційні метеорологічні комплекси є дорогими, енергозатратними та складними в розгортанні, що обмежує можливість їх масштабування.

Особливу актуальність має використання бездротових мереж далекого радіусу дії з низьким енергоспоживанням (LPWAN), зокрема технології LoRaWAN, яка забезпечує передачу даних на великі відстані за мінімального енергоспоживання сенсорних вузлів. Це дозволяє створювати автономні метеорологічні станції, здатні працювати тривалий час без обслуговування, що є критично важливим для віддалених або важкодоступних територій.

Разом із цим, ефективність таких систем значною мірою залежить від застосування сучасних методів обробки, аналізу та прогнозування часових рядів метеорологічних даних. Наявність шумів, втрат пакетів та похибок сенсорів зумовлює необхідність використання математичних і статистичних алгоритмів фільтрації, декомпозиції та прогнозування. Тому розробка комп'ютерної системи моніторингу погодних умов з використанням безпроводних інтерфейсів і застосуванням ефективних методів обробки даних є актуальною науково-практичною задачею.

Метою магістерської роботи є розробка та дослідження комп'ютерної системи моніторингу погодних умов із використанням безпроводного інтерфейсу, сучасних методів обробки, аналізу та прогнозування метеорологічних даних.

Для досягнення поставленої мети в роботі необхідно вирішити такі задачі:

- провести аналіз предметної області та огляд існуючих рішень у сфері IoT-систем метеорологічного моніторингу;
- обґрунтувати вибір апаратних і програмних засобів для побудови системи на базі LoRaWAN;
- дослідити та обрати методи фільтрації, аналізу й прогнозування метеорологічних даних;
- розробити алгоритми функціонування сенсорних вузлів і серверної частини системи;
- реалізувати апаратно-програмний комплекс метеорологічної станції;
- оцінити економічну ефективність розробленої системи.

У роботі використовуються такі **методи дослідження**: методи системного аналізу, методи моделювання комп'ютерних та телекомунікаційних систем, методи статистичної обробки часових рядів, методи алгоритмізації та програмування вбудованих систем.

Об'єктом дослідження є процеси збору, передачі та обробки метеорологічних даних у бездротових IoT-системах моніторингу.

Предметом дослідження є методи, моделі та алгоритми функціонування комп'ютерної системи моніторингу погодних умов з використанням безпроводних інтерфейсів.

Наукова новизна роботи полягає у вдосконаленні підходу до обробки метеорологічних даних у LoRaWAN-системах за рахунок поєднання фільтрації в реальному часі, декомпозиції часових рядів і статистичного прогнозування, що підвищує точність та надійність отриманих результатів за умов обмежених обчислювальних і енергетичних ресурсів сенсорних вузлів.

Практичне значення роботи полягає у можливості використання розробленої комп'ютерної системи для створення автономних метеорологічних станцій у сільському господарстві, екологічному моніторингу та розумній інфраструктурі. Отримані результати можуть бути використані в навчальному процесі підготовки фахівців за спеціальністю «Комп'ютерна інженерія», а також при проєктуванні та впровадженні IoT-рішень на базі технології LoRaWAN.

Апробація результатів роботи здійснена у журналі «Вісник Вінницького політехнічного інституту», яке входить до Переліку наукових фахових видань України у галузі технічних наук.

Матеріали роботи доповідались та опубліковувались [1]:

Савицька Л.А., Тичина Б.Р., Азаров О. Д., Клепо Д.Д. "Оптимізація енергоспоживання у сенсорних вузлах lorawan" // Вісник ВПІ, вип. 1, с. 16–20, Лютий. 2026. URL: <https://visnyk.vntu.edu.ua/index.php/visnyk/index>

1 АНАЛІЗ МЕРЕЖ ТА ОГЛЯД ІСНУЮЧИХ РІШЕНЬ

1.1 Аналіз безпроводних мереж

У сучасних умовах розвитку інформаційних технологій та концепцій Інтернету речей (IoT) системи моніторингу погодних умов дедалі частіше будуються з використанням безпроводних інтерфейсів. Це зумовлено необхідністю збору даних з великої кількості віддалених сенсорних вузлів, які можуть бути розміщені на значних відстанях один від одного та працювати в автономному режимі протягом тривалого часу. Такі системи знаходять широке застосування в агросекторі, міській інфраструктурі, енергетиці, екологічному моніторингу та в рамках концепції «Розумного міста» (Smart City).

Для організації безпроводного зв'язку в системах моніторингу погодних умов можуть використовуватися різні мережеві технології, кожна з яких має свої переваги та обмеження.

Однією з найбільш поширених технологій є Wi-Fi, яка забезпечує високу швидкість передачі даних та простоту інтеграції з існуючою IP-інфраструктурою. Проте її недоліками є обмежений радіус дії та високе енергоспоживання, що робить Wi-Fi малопридатною для автономних метеорологічних станцій, розміщених на відкритій місцевості або у віддалених районах.

Іншою технологією є ZigBee, яка орієнтована на низьке енергоспоживання та підтримує мережі з великою кількістю вузлів. Вона добре підходить для локальних сенсорних мереж і систем автоматизації, однак має невеликий радіус дії та потребує багатовузлової топології для покриття великих територій, що ускладнює розгортання метеомоніторингу на значних площах.

Також перспективною є технологія NB-IoT, яка використовує стільникову інфраструктуру операторів мобільного зв'язку та забезпечує широке покриття і надійність передачі даних. Водночас її застосування пов'язане з залежністю від операторів зв'язку, використанням ліцензованих частот та додатковими

фінансовими витратами, що не завжди є доцільним для масового розгортання автономних сенсорних вузлів.

Особливе місце серед безпроводних інтерфейсів займають мережі класу LPWAN (Low-Power Wide Area Network), призначені для передачі невеликих обсягів даних на великі відстані при мінімальному енергоспоживанні. Однією з найбільш поширених LPWAN-технологій є LoRaWAN.

Технологія LoRaWAN базується на модуляції LoRa та відкритому протоколі LoRaWAN і забезпечує надійну безпроводну передачу даних на відстані до 10–15 км. Вона дозволяє обслуговувати тисячі кінцевих пристроїв за допомогою однієї базової станції (шлюзу) та підтримує швидкість передачі даних у діапазоні від 0,3 до 50 Кбіт/с. Основною перевагою LoRaWAN є наднизьке енергоспоживання, що забезпечує багаторічну автономну роботу сенсорних вузлів від батарей або альтернативних джерел живлення.

Мережа LoRaWAN має топологію «зірка із зірок», у якій кінцеві пристрої передають дані на один або декілька шлюзів, що виконують роль прозорих мостів між радіомережею та IP-мережею. Шлюзи пересилають отриману інформацію на мережевий сервер, який відповідає за управління мережею, обробку метаданих, адаптацію швидкості передачі та маршрутизацію повідомлень до серверів додатків. Сервер додатків забезпечує зберігання даних, їх аналіз, візуалізацію та дистанційне керування кінцевими пристроями.

У системі LoRaWAN виділяють три основні класи кінцевих пристроїв — А, В та С, які відрізняються режимами прийому і передачі даних. Клас А забезпечує мінімальне енергоспоживання і є найбільш придатним для автономних сенсорів. Клас В дозволяє серверу передавати дані у визначені часові інтервали, а клас С забезпечує практично безперервний прийом даних, що підходить для пристроїв із постійним живленням (рис 1.1).

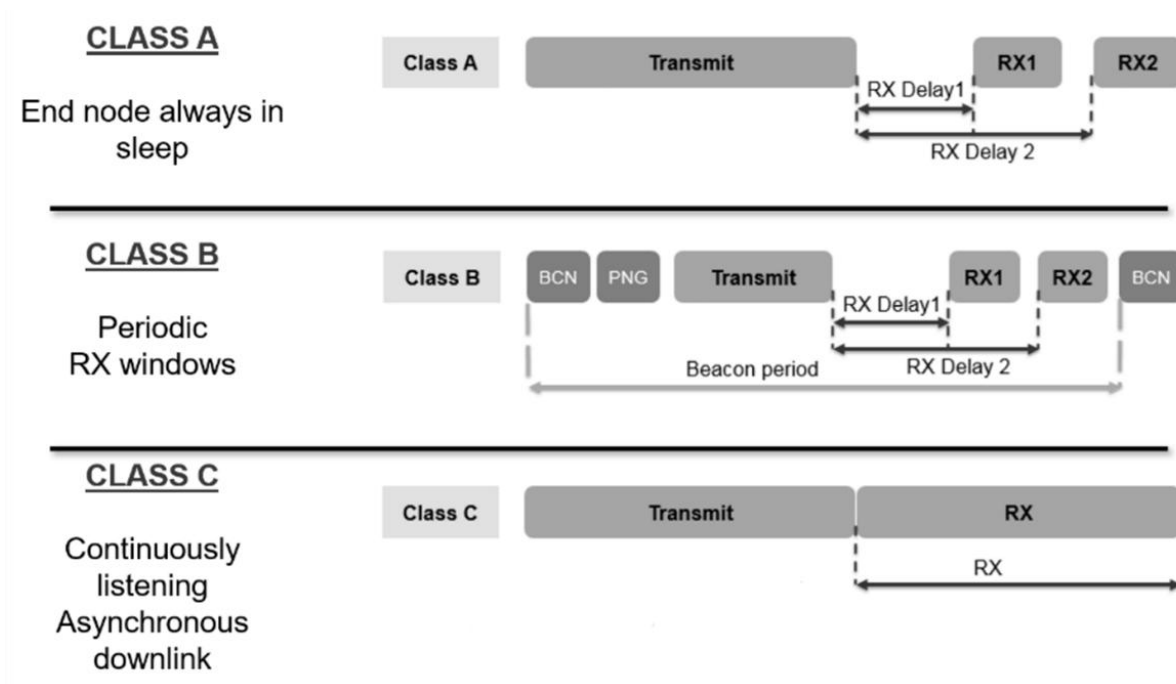


Рисунок 1.1 — Порівняння класів кінцевих пристроїв

З урахуванням вимог до системи моніторингу погодних умов — великої дальності зв'язку, низького енергоспоживання, масштабованості та можливості тривалої автономної роботи — мережу LoRaWAN було обрано як найбільш оптимальний безпроводний інтерфейс для реалізації розроблюваної комп'ютерної системи.

1.2 Переваги обраної мережі

Технологія LoRaWAN відома своїми значними перевагами:

- немає потреби у ліцензуванні використовуваних частот (868,6 МГц), на яких функціонують мережі LoRaWAN;
- можливість обслуговувати кілька тисяч пристроїв однією базовою станцією;
- широкий радіус дії сигналу;
- висока стійкість до зовнішніх перешкод;
- довгий термін служби батареї, який може досягати 10 років;
- можливість автономної роботи пристрою за допомогою сонячних батарей до кінця його ресурсу.

Особливості технології

LoRaWAN являє собою передову технологію бездротового зв'язку, яка вирізняється високою надійністю та мінімальним споживанням енергії.

Термін служби батареї

У порівнянні з іншими доступними технологіями, LoRaWAN забезпечує значно триваліший термін служби батареї завдяки енергоефективності, яка досягається через асинхронний обмін даними тільки коли це необхідно, що знижує загальне споживання енергії.

Легкість розгортання

Завдяки мінімальним вимогам до інфраструктури, встановлення мережі LoRaWAN вимагає лише придбання шлюзу та датчиків, причому сучасні шлюзи підтримують різні види підключення, включаючи 3G, 4G та Ethernet.

Ємність мережі

Одна базова станція може одночасно обслуговувати кілька тисяч пристроїв, що дозволяє швидко розширювати мережу з мінімальними витратами.

Безпека

LoRaWAN забезпечує високий рівень безпеки завдяки використанню кількох рівнів шифрування AES:

- на мережевому рівні з унікальним ключем мережі (Unique Network Key, EUI64);
- наскрізна безпека на рівні додатків з унікальним ключем додатку (Unique Application Key, EUI64);
- за допомогою спеціалізованого ключа пристрою (Device Specific Key, EUI128).

Це забезпечує аутентифікацію і цілісність даних на мережевому сервері та захищене шифрування на сервері додатків.

Варіанти застосування системи

Комп'ютерна система моніторингу погодних умов може бути використана в різних сценаріях, завдяки своїм перевагам у дальності передачі даних та енергоефективності:

Використання LoRaWAN для моніторингу погодних умов на великих фермерських полях дозволяє агрономам збирати дані про температуру, вологість, опади та інші показники. Це допомагає в оптимізації зрошення, внесення добрив та захисту від шкідників.

Міські власті можуть використовувати станції для відслідковування погодних умов у різних частинах міста для кращого реагування на погодні зміни, наприклад, для підготовки до снігопадів або злив.

LoRaWAN станції можуть використовуватися для відстеження погодних умов у віддалених або важкодоступних регіонах, де необхідно стежити за кліматичними змінами або екологічним станом.

Вчені можуть використовувати такі станції для збору даних у рамках довгострокових досліджень атмосферних явищ, зміни клімату або метеорології.

Моніторинг погодних умов може допомагати у плануванні маршрутів та безпеці транспортних засобів, особливо в умовах екстремальної погоди.

Енергетичні компанії можуть використовувати дані для оптимізації виробництва і розподілу енергії, особливо в областях, де виробництво залежить від погодних умов, як-от сонячна та вітрова енергія.

1.3 Існуючі рішення на ринку

На даний момент існує невелика кількість готових виробів на ринку. Ось деякі з них :

1) Davis Instruments Vantage Pro 2 — Це дуже надійна метеостанція, яка підтримує LoRaWAN для передачі даних (Рисунок 1.1). Вона вимірює температуру, вологість, атмосферний тиск, кількість опадів, швидкість вітру та багато іншого.



Рисунок 1.1 — Davis Instruments Vantage Pro2

Метеостанція Vantage Pro 2 6152 Davis Instruments - це бездротовий комплекс для професійного моніторингу погодних умов.

Метеостанція Vantage Pro 2 6152 забезпечує:

- передачу даних на відстань до 300 метрів;
- живлення від сонячної батареї;
- оновлення даних кожні 2,5 секунди;
- сумісність з програмним забезпеченням WeatherLink для передачі даних на ПК або веб-сайт.

Збір погодних даних відбувається за допомогою датчиків кліматичного блоку метеостанції Davis 6152 Vantage Pro 2, який складається з погодостійкого матеріалу, що забезпечує надійність і довговічність використання.

Датчики кліматичного блоку вимірюють:

- прогноз погоди на 48 годин;
- атмосферний тиск;
- швидкість і напрямок вітру;
- температуру і вологість повітря;

— кількість і інтенсивність опадів.

Кількість вимірюваних параметрів можна збільшити, додавши додаткові датчики для вимірювання сонячного і ультрафіолетового випромінювання, вологості листя, вологості і температури ґрунту тощо.

Дані відображаються на цифровій консолі метеостанції, яка записує і відображає інформацію з кліматичного блоку, а також температуру і вологість повітря в приміщенні, атмосферний тиск. Консоль малює графіки та сигналізує про вихід параметрів за допустимі межі.

Консоль може приймати дані від 8 метеопристроїв Davis Instruments, таких як інші консолі, блоки вимірювання температури і вологості, модулі WeatherEnvoy та Envoy8X, Vantage Connect.

Підключення до комп'ютера здійснюється за допомогою програмного забезпечення WeatherLink через USB або серійне з'єднання для передачі, збереження, обробки і аналізу даних. Дані можна передавати на вебсайт і переглядати їх з будь-якого ПК або смартфона.

Основні функціональні можливості:

- вимірювання атмосферного тиску з відображенням тенденцій змін за останні три години;
- символічний прогноз погоди на 12 годин з оновленням щогодини, можливе відображення прогнозу на 48 годин у вигляді рядка, що біжить;
- вимірювання температури і вологості повітря в приміщенні з високою точністю;
- поточний час, календар, час сходу і заходу сонця, фази місяця, автоматичний перехід на літній час, будильник;
- частота передачі даних 868,35 мгц з дальністю зв'язку до 300 м.
- вимірювання зовнішньої температури і вологості повітря, визначення точки роси, індексу нагрівання;
- вимірювання швидкості і напрямку вітру;
- вимірювання кількості опадів, що випали за день або певний період, з відображенням інтенсивності опадів;

- вимірювання інтенсивності сонячного випромінювання, індексу THSW і сумарного випаровування;
- вимірювання індексу і дози ультрафіолетового випромінювання, вологості листя, температури і вологості ґрунту;
- функція калібрування внутрішньої і зовнішньої температури, вологості, напрямку вітру та атмосферного тиску.

Метеостанція Davis 6152 Vantage Pro2 оптимізована для роботи з мінімальним споживанням енергії, не потребує обов'язкового блоку живлення. Три лужні батареї типу «С» забезпечують роботу консолі протягом 12 місяців. Живлення блоку метеодатчиків і анемометра здійснюється за допомогою сонячної і літєвої батарей. Консоль може приймати інформацію від 8 передавачів атмосферного тиску.

Комплект поставки:

- консоль (6312);
- анемометр з кабелем (12 м);
- блок метеодатчиків (6322);
- блок живлення на 220В;
- кріплення для монтажу;
- інструкція;
- річна гарантія офіційного представника DAVIS в Україні.

Додаткове обладнання:

- можливість перегляду даних з більш ніж одного місця;
- бездротові станції для вимірювання вологості і температури ґрунту і листя;
- бездротова станція температури;
- бездротові станції температури і вологості;
- анемометр/ретранслятор датчика.

2) Метеостанція Netatmo Weather Station — це сучасний пристрій для моніторингу погодних умов, призначений як для домашнього, так і для професійного використання. Вона пропонує широкий спектр можливостей для

вимірювання та аналізу погодних даних, а також інтеграцію з системами "розумного дому". З додатковою підтримкою LoRaWAN, ця метеостанція забезпечує ще більш надійну передачу даних на великі відстані (Рисунок 1.2).



Рисунок 1.2 — Netatmo Weather Station

Netatmo Weather Station — це стильна та інноваційна метеостанція, яка складається з двох основних модулів: внутрішнього та зовнішнього. Цей пристрій дозволяє користувачам отримувати точні дані про температуру, вологість, рівень CO₂, шум, атмосферний тиск та інші параметри. Дані передаються на мобільні пристрої через Wi-Fi або LoRaWAN, що дозволяє легко відстежувати погодні умови в реальному часі навіть у віддалених місцях.

Технічні характеристики

Основний модуль:

- модель — Netatmo Weather Station;
- живлення — внутрішній модуль: USB адаптер, Зовнішній модуль: 2 батарейки AAA (тривалість роботи до 1 року);
- зв'язок — Wi-Fi (802.11 b/g/n) або LoRaWAN;
- робоча температура — внутрішній модуль: 0°C до 50°C, Зовнішній модуль: -40°C до 65°C;
- вологість — 0% до 100% RH.

Датчики:

- температура — діапазон вимірювань: від -40°C до 65°C , точність: $\pm 0.3^{\circ}\text{C}$;
- вологість — діапазон вимірювань: від 0% до 100% RH, точність: $\pm 3\%$ RH;
- атмосферний тиск — діапазон вимірювань: від 260 до 1160 hPa, точність: ± 1 hPa;
- рівень CO₂ (внутрішній модуль) — діапазон вимірювань: від 0 до 5000 ppm, Точність: ± 50 ppm або $\pm 5\%$;
- рівень шуму (внутрішній модуль) — діапазон вимірювань: від 35 до 120 dB, точність: ± 3 dB.

Інтерфейси та сумісність:

- програмне забезпечення — сумісність з Netatmo Weather App (iOS, Android, Web);
- протокол — підтримка IFTTT для інтеграції з системами "розумного дому";
- підтримка хмарних сервісів — Netatmo Cloud, можливість доступу до даних через веб-інтерфейс;
- LoRaWAN: Підтримка передачі даних через мережі LoRaWAN для моніторингу у віддалених місцях.

Функції:

- реальний час — відображення даних в реальному часі на смартфонах та планшетах;
- історія даних — зберігання та аналіз історичних даних;
- повідомлення — налаштування сповіщення про зміну погодних умов;
- інтеграція з "розумним домом" — можливість підключення до систем "розумного дому" для автоматизації процесів на основі погодних даних;
- додаткові датчики — підтримка додаткових модулів для вимірювання швидкості та напрямку вітру, кількості опадів.

Netatmo Weather Station — це стильний та функціональний пристрій для моніторингу погодних умов, який забезпечує точні вимірювання та зручний інтерфейс для користувачів. Завдяки можливостям інтеграції з системами "розумного дому", зберіганню історичних даних та підтримці LoRaWAN для передачі даних на великі відстані, ця метеостанція ідеально підходить як для домашнього, так і для професійного використання.

3) Метеостанція Ecowitt GW1000 — це багатофункціональний прилад, який дозволяє відстежувати різноманітні метеорологічні дані в режимі реального часу. Вона відрізняється високою точністю вимірювань та широкими можливостями для моніторингу погоди. Завдяки додатковій підтримці LoRaWAN, ця метеостанція забезпечує надійну передачу даних на великі відстані (Рисунок 1.3).



Рисунок 1.3 — Ecowitt GW1000

Ecowitt GW1000 — це інтелектуальна метеостанція, яка збирає дані від різних сенсорів та передає їх на мобільні пристрої через Wi-Fi або LoRaWAN. Цей пристрій підходить як для домашнього використання, так і для професійного

моніторингу погоди. Метеостанція має компактний дизайн та простий у користуванні інтерфейс.

Технічні характеристики

Основний модуль:

- модель: GW1000;
- живлення: USB (5V/1A);
- зв'язок: Wi-Fi (802.11 b/g/n) або LoRaWAN;
- робоча температура: -10°C до 60°C;
- вологість: 0% до 99% RH.

Датчики:

Температура та вологість:

- діапазон вимірювань температури: від -40°C до 60°C;
- точність температури: $\pm 0.5^\circ\text{C}$;
- діапазон вимірювань вологості: від 0% до 99% RH;
- точність вологості: $\pm 5\% \text{ RH}$.

Атмосферний тиск:

- діапазон вимірювань: від 300 до 1100 hPa;
- точність: $\pm 1 \text{ hPa}$.

Швидкість та напрямок вітру:

- діапазон вимірювань швидкості вітру: від 0 до 50 м/с;
- точність: $\pm 1 \text{ м/с}$;
- діапазон вимірювань напрямку вітру: 0-360°.

Опади:

- діапазон вимірювань: від 0 до 9999 мм;
- точність: $\pm 1 \text{ мм}$.

Інтерфейси та сумісність:

- програмне забезпечення — сумісність з Ecowitt App, WS View App;
- протокол — підтримка протоколу MQTT для інтеграції з системами "розумного дому";

- підтримка хмарних сервісів — Ecowitt Weather Server, Weather Underground, Weather Cloud, WOW;
- підтримка передачі даних через мережі LoRaWAN для моніторингу у віддалених місцях.

Функції:

- відображення даних в реальному часі;
- зберігання історичних даних для подальшого аналізу;
- налаштування повідомлення про погодні умови;
- можливість підключення до систем "розумного дому" для автоматизації процесів на основі погодних даних.

Ecowitt GW1000 — це надійна та багатофункціональна метеостанція, яка дозволяє отримувати точні погодні дані та легко інтегрується в сучасні системи "розумного дому". Завдяки підтримці LoRaWAN для передачі даних на великі відстані, ця метеостанція ідеально підходить як для домашнього, так і для професійного використання.

4) Метеостанція IoT WTS505 — це універсальна система моніторингу погодних умов LoRaWAN® для різноманітних атмосферних параметрів, таких як температура, вологість, швидкість і напрямок вітру, атмосферний тиск. Система складається з трьох основних компонентів: датчиків WTS, концентратора WTS та сонячної панелі (Рисунок 1.4).



Рисунок 1.4 — IoT WTS505

Метеостанція IoT розроблена для витримування найскладніших погодних умов і легко встановлюється у різних сценаріях, що дозволяє широко використовувати її в метеорології, інтелектуальному сільському господарстві, інтелектуальному будівництві тощо.

Дані з датчиків передаються за допомогою технології LoRaWAN®. Завдяки сумісності зі шлюзом Milesight LoRaWAN® та рішенням Milesight IoT Cloud користувачі можуть керувати всіма даними з датчиків і легко запускати інші датчики або пристрої віддалено через веб-сторінку або мобільний додаток.

Основні характеристики:

- вимірювання температури, вологості, швидкості і напрямку вітру, атмосферного тиску;
- висока роздільна здатність і точність даних дослідницького рівня;
- міцний корпус з алюмінієвого сплаву, стійкий до іржі, корозії та окислення;

— моніторинг погоди для складних або орієнтованих на точність умов, таких як попередження про раптові повені, національний метеорологічний моніторинг тощо.

Функції:

— інтеграція з декількома датчиками, такими як вологість, температура, атмосферний тиск, швидкість і напрямок вітру тощо;

— водонепроникний, стійкий до ультрафіолетового випромінювання та соляного туману корпус для використання на відкритому повітрі в суворих умовах;

— потужна сонячна панель з акумуляторами, що перезаряджаються;

— зберігання локально понад 19 000 історичних записів та підтримка повторної передачі для забезпечення збереження даних;

— легкість у перенесенні та встановленні;

— бездротова передача на наддовгій дистанції до 15 км у сільській місцевості;

— оснащення NFC для простої та швидкої настройки;

— сумісність зі стандартними шлюзами та мережевими серверами LoRaWAN;

— швидке і просте управління за допомогою Milesight IoT Cloud.

5) Метеостанція Dragino LoRaWAN Weather Station — це сучасний пристрій для моніторингу погодних умов, призначений для використання як в домашніх умовах, так і для професійних потреб. Завдяки підтримці LoRaWAN, ця метеостанція забезпечує надійну передачу даних на великі відстані, що дозволяє отримувати точні погодні дані навіть у віддалених місцях (Рисунок 1.5).



Рисунок 1.5 — Dragino LoRaWAN Weather Station

Dragino LoRaWAN Weather Station — це компактна та функціональна метеостанція, яка складається з кількох датчиків для вимірювання різних параметрів погоди. Пристрій збирає дані про температуру, вологість, атмосферний тиск, швидкість та напрямок вітру, а також кількість опадів. Всі зібрані дані передаються через мережу LoRaWAN, що забезпечує надійний зв'язок на великі відстані та низьке енергоспоживання.

Технічні характеристики

Основний модуль:

- модель: Dragino LoRaWAN Weather Station;
- живлення: Батарейки або зовнішнє живлення (опціонально);
- зв'язок: LoRaWAN;
- робоча температура: -40°C до 85°C ;
- вологість: 0% до 100% RH.

Датчики:

Температура:

- діапазон вимірювань: від -40°C до 85°C ;
- точність: $\pm 0.2^{\circ}\text{C}$.

Вологість:

- діапазон вимірювань: від 0% до 100% RH;
- точність: $\pm 2\%$ RH.

Атмосферний тиск:

- діапазон вимірювань: від 300 до 1100 hPa;
- точність: ± 1 hPa.

Швидкість та напрямок вітру:

- діапазон вимірювань швидкості вітру: від 0 до 30 м/с;
- точність: ± 0.3 м/с;
- діапазон вимірювань напрямку вітру: 0-360°.

Опади:

- діапазон вимірювань: від 0 до 1000 мм;
- точність: ± 1 мм.

Інтерфейси та сумісність:

- сумісність з різними платформами LoRaWAN;
- підтримка LoRaWAN для передачі даних на великі відстані;
- інтеграція з різними хмарними платформами для зберігання та аналізу даних.

Функції:

- відображення даних в реальному часі;
- зберігання історичних даних для подальшого аналізу;
- налаштування повідомлення про зміну погодних умов;
- можливість підключення до систем "розумного дому" для автоматизації процесів на основі погодних даних.

Dragino LoRaWAN Weather Station — це надійна та багатофункціональна метеостанція, яка дозволяє отримувати точні погодні дані та передавати їх на великі відстані завдяки підтримці LoRaWAN. Завдяки високій точності вимірювань та широким можливостям для моніторингу погоди, ця метеостанція є ідеальним вибором як для домашнього, так і для професійного використання.

Приклади реалізованих проєктів у світі та Україні

У світі є кілька відомих реалізацій таких проєктів. Один з них — це The Things Network (TTN), глобальний проєкт з вузлами у багатьох країнах. TTN використовує LoRaWAN для створення відкритої, спільотно-керованої мережі, де встановлені метеостанції відправляють дані про погоду. OpenWeatherMap також використовує LoRaWAN для збору метеорологічних даних з різних куточків світу і надає їх через API. Ще один проєкт — SenseBox у Німеччині, що використовує LoRaWAN для збору екологічних та метеорологічних даних у міському середовищі та дозволяє школярам і студентам створювати власні метеостанції.

В Україні також є декілька таких проєктів. У Харкові реалізовано метеостанцію в рамках університетських досліджень для збору даних про погодні умови та забруднення повітря, де використовується LoRaWAN для передачі даних у реальному часі. Проєкт Smart Cities Ukraine діє у Києві, Львові та Одесі, де встановлено метеостанції для моніторингу погодних умов та екологічних показників, інтегрованих у міські інформаційні системи.

Проєкт "Агромоніторинг" у Західній Україні використовує LoRaWAN метеостанції для моніторингу погодних умов та оптимізації аграрних процесів, що допомагає підвищити ефективність аграрного виробництва. Ці проєкти демонструють потенціал використання LoRaWAN у різних сферах, від міського планування до аграрного сектору, забезпечуючи точний та оперативний збір даних для прийняття обґрунтованих рішень.

1.4 Вимоги до системи

ПРИЗНАЧЕННЯ ТА МЕЖІ ПРОЄКТУ

Призначення системи (застосунку), для якої розробляється апаратно-програмне забезпечення

Система призначена для моніторингу погодних умов в реальному часі, використовуючи технологію LoRaWAN. Вона забезпечує збір даних про температуру, вологість, тиск, швидкість та напрямок вітру з можливістю віддаленого доступу та аналізу цих даних.

Межі використання проєкту

Проєкт призначений для використання у сільському господарстві, екологічному моніторингу, метеорології та інших галузях, де необхідний точний моніторинг погодних умов.

ЗАГАЛЬНИЙ ОПИС

Сфера застосування

Система застосовується для збору та аналізу метеорологічних даних, з можливістю їх передачі через бездротові мережі на великі відстані.

Загальна структура і склад АПЗ. Системні вимоги

АПЗ складається з апаратних модулів (датчиків), контролера з підтримкою LoRaWAN, програмного забезпечення для збору та аналізу даних, а також інтерфейсу для користувачів. Системні вимоги включають наявність інтернет-з'єднання та відповідних пристроїв для доступу до даних.

Загальні обмеження

Система повинна функціонувати в різних кліматичних умовах, з урахуванням можливих екстремальних температур та вологості.

ВИМОГИ ДО АПАРАТНОГО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ

Датчики температури, вологості, атмосферного тиску, швидкості та напрямку вітру.

Контролер з підтримкою LoRaWAN.

Блок живлення (сонячні панелі або акумулятори для автономної роботи).

ВИМОГИ ДО ПРОГРАМНОГО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ

Архітектура програмної системи

Система складається з трьох рівнів: рівень збору даних, рівень передачі даних, рівень аналізу та відображення даних.

Системне програмне забезпечення

Операційна система контролера повинна підтримувати протоколи LoRaWAN та забезпечувати стабільну роботу в реальному часі.

Мережеве програмне забезпечення

Забезпечує передачу даних з датчиків на віддалений сервер через LoRaWAN.

Програмне забезпечення ведення інформаційної бази

База даних для зберігання історичних та поточних даних з датчиків, з можливістю доступу та аналізу.

Мова і технологія розробки ПЗ

Розробка ведеться з використанням мов програмування C/C++ для контролерів, Python для серверної частини та веб-технологій.

ВИМОГИ ДО ЗОВНІШНІХ ІНТЕРФЕЙСІВ

Інтерфейс користувача

Веб-інтерфейс для доступу до даних з будь-якого пристрою з інтернет-з'єднанням.

Апаратний інтерфейс

Інтерфейси для підключення датчиків до контролера (I2C, SPI, UART).

Програмний інтерфейс

API для взаємодії з базою даних та аналітичним програмним забезпеченням.

Комунікаційний протокол

LoRaWAN для передачі даних від датчиків до сервера.

ІНШІ ВИМОГИ

Супроводжуваність

Програмне та апаратне забезпечення повинні мати документацію для технічного обслуговування та оновлення.

Транспортування (мобільність)

Система повинна бути мобільною і легко транспортуватися для розгортання в нових місцях.

Продуктивність

Система повинна забезпечувати реальний час обробки даних з мінімальною затримкою для своєчасного аналізу погодних умов.

2 МЕТОДИ, МОДЕЛІ ТА АЛГОРИТМИ ФУНКЦІОНУВАННЯ

2.1 Методи опрацювання сигналів

Для розробки та аналізу станції відслідковування погодних умов на базі LoRaWAN використовуються різні математичні методи.

До збору та фільтрації даних можна віднести наступні алгоритми.

1) Фільтрація шуму: Фільтр Калмана — це математичний алгоритм, який використовують для оцінки стану динамічної системи з урахуванням шуму вимірювань та інших неточностей (Рисунок 2.1). Він часто застосовується в системах навігації, робототехніці, фінансовому аналізі та обробці сигналів, зокрема в погодних станціях для фільтрації шуму у вимірюваннях.

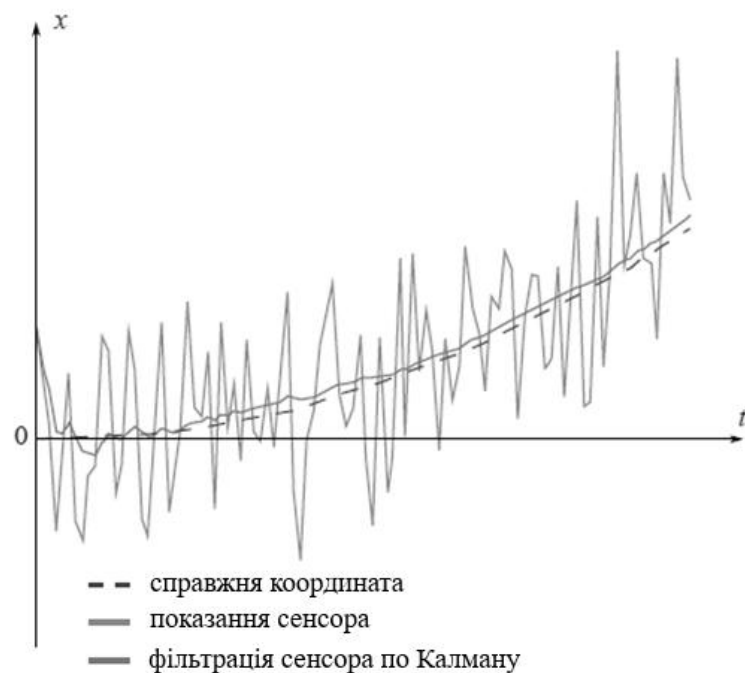


Рисунок 2.1 — Приклад роботи фільтра Калмана

Основні поняття фільтра Калмана

Фільтр Калмана працює у два етапи: прогноз та оновлення.

Прогноз:

Прогноз стану: На основі попереднього стану та моделі системи обчислюється прогнозований стан.

Прогноз помилки: Оцінюється помилка прогнозованого стану.

Оновлення:

Інновація: Обчислюється різниця між фактичним вимірюванням і прогнозованим вимірюванням (помилка вимірювання або залишок).

Оновлення стану: Прогнозований стан коригується з урахуванням інновації та відповідної ваги (Калманівського коефіцієнта).

Оновлення помилки: Оцінюється нова помилка стану після оновлення.

Математична модель

Прогноз стану (2.1):

$$\hat{x}_{k|k-1} = A\hat{x}_{k-1|k-1} + Bu_k \quad (2.1)$$

де $\hat{x}_{k|k-1}$ — прогнозований стан в момент часу k ;

A — матриця переходу стану;

$\hat{x}_{k-1|k-1}$ — оцінений стан в попередній момент часу;

B — матриця керування;

u_k — вектор керування.

Прогноз помилки (2.2):

$$P_{k|k-1} = AP_{k-1|k-1}A^T + Q \quad (2.2)$$

де $P_{k|k-1}$ — прогнозована коваріаційна матриця помилок;

$P_{k-1|k-1}$ — оцінена коваріаційна матриця помилок в попередній момент часу;

Q — коваріаційна матриця шуму процесу.

Оновлення

Інновація (2.3):

$$y_k = z_k - H\hat{x}_{k|k-1} \quad (2.3)$$

де y_k — інновація (помилка вимірювання);
 z_k — фактичне вимірювання;
 H — матриця вимірювань.
 Калманівський коефіцієнт (2.4):

$$K_k = P_{k|k-1} H^T (H P_{k|k-1} H^T + R)^{-1} \quad (2.4)$$

де K_k — Калманівський коефіцієнт;
 R — ковариційна матриця шуму вимірювань.
 Оновлення стану (2.5):

$$\hat{x}_{k|k} = \hat{x}_{k|k-1} + K_{kyk} \quad (2.5)$$

Оновлення помилки (2.6):

$$P_{k|k} = (I - K_k H) P_{k|k-1} \quad (2.6)$$

де I — одинична матриця.

Приклад застосування

Припустимо, використовуємо фільтр Калмана для прогнозування температури на погодній станції. Нехай x_k — це поточне значення температури, z_k — виміряне значення температури, яке містить шум. Процес можна описати як лінійну динамічну систему:

Стан температури змінюється незначно з кожним кроком, тому матриця переходу стану A може бути простою одиничною матрицею.

Вимірювання температури здійснюється напряму, тому матриця вимірювань H також є одиничною.

Це дозволить ефективно фільтрувати шум у вимірюваннях та забезпечити точнішу оцінку поточної температури на станції.

Лінійна інтерполяція — це простий метод для побудови нових даних в межах діапазону відомих точок (Рисунок 2.2). Він використовується для заповнення пропущених значень у часових рядах або для побудови функцій на основі обмеженого набору даних. У випадку погодних станцій, лінійна інтерполяція може використовуватися для оцінки відсутніх значень температури, вологості або інших параметрів.

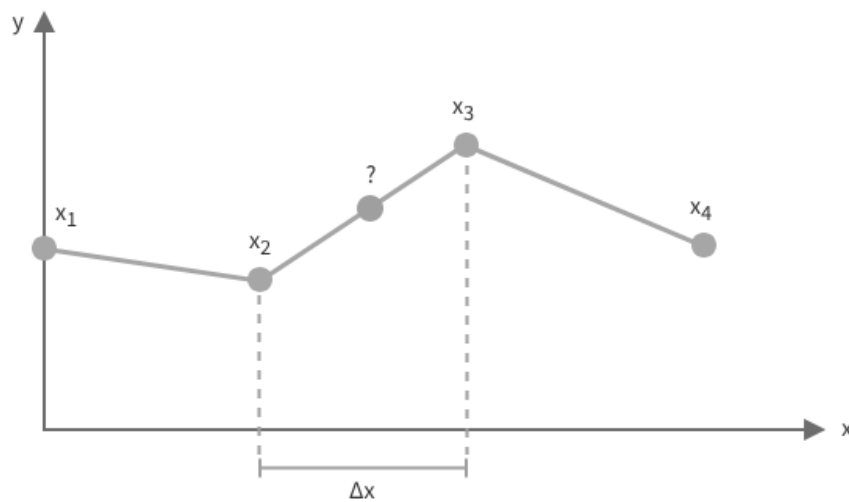


Рисунок 2.2 — Графік лінійної інтерполяції

Основні поняття лінійної інтерполяції

Лінійна інтерполяція передбачає, що дві точки (x_0, y_0) і (x_1, y_1) можна з'єднати прямою лінією. Нове значення y для будь-якого x між x_0 і x_1 може бути обчислене за формулою (2.7):

$$y = y_0 + (x - x_0) \times \frac{y_1 - y_0}{x_1 - x_0} \quad (2.7)$$

де (x_0, y_0) та (x_1, y_1) — відомі точки;

x — точка, для якої потрібно знайти значення y .

Приклад лінійної інтерполяції

Припустимо, є дані про температуру в певний час:

$$T(1) = 15^{\circ}\text{C}$$

$$T(3) = 21^{\circ}\text{C}$$

І потрібно знайти температуру у момент часу $t=2$.

Позначимо:

$$x_0 = 1, y_0 = 15$$

$$x_1 = 3, y_1 = 21$$

$$x = 2$$

Використовуємо формулу лінійної інтерполяції:

$$y = 15 + (2 - 1) \times \frac{21 - 15}{3 - 1}$$

$$y = 15 + 1 \times \frac{6}{2}$$

$$y = 15 + 3 = 18$$

Отже, інтерпольоване значення температури в момент часу $t=2$ становить 18°C .

Використання лінійної інтерполяції на погодній станції

Лінійна інтерполяція застосовується для:

Заповнення пропущених значень у часових рядах, оцінки параметрів між вимірюваннями, якщо вимірювання проводяться з великою періодичністю, згладжування даних для візуалізації або подальшого аналізу.

До аналізу часових рядів можна віднести наступні алгоритми.

2) Тренд та сезонність: STL-декомпозиція (Seasonal and Trend decomposition using Loess) — це метод декомпозиції часових рядів, який дозволяє розділити дані на три компоненти: тренд, сезонність та залишки (Рисунок 2.3). Цей метод є особливо корисним для аналізу даних з погодних станцій, оскільки він допомагає виділити основні тенденції та циклічні коливання у даних.

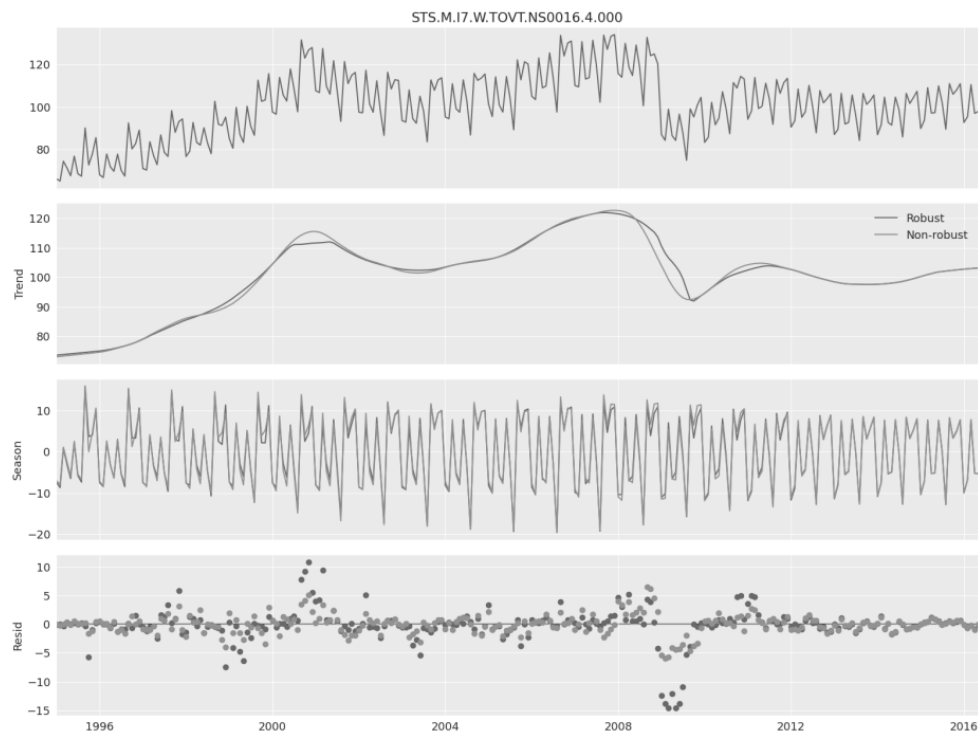


Рисунок 2.3 — Аналіз даних STL-декомпозиції

Основні компоненти STL-декомпозиції

Трендова складова (Trend component): Відображає довгострокову зміну в даних.

Сезонна складова (Seasonal component): Відображає періодичні коливання, які повторюються з певним інтервалом (наприклад, річні сезонні зміни температури).

Залишкова складова (Residual component): Відображає шум або випадкові коливання, які не пояснюються трендом чи сезонністю.

Процедура STL-декомпозиції

STL-декомпозиція використовує локально зважену регресію (Loess) для згладжування даних і виділення компонент. Процедура включає наступні кроки:

Виділення сезонної компоненти: Виявлення та вилучення сезонних коливань з даних.

Виділення трендової компоненти: Згладжування залишкових даних для виділення довгострокового тренду.

Обчислення залишкової компоненти: Визначення залишкових даних після виділення тренду та сезонності.

Застосування в аналізі погодних даних

STL-декомпозиція дозволяє ефективно аналізувати погодні дані, виявляючи довгострокові зміни (наприклад, глобальне потепління), сезонні патерни (річні цикли температури) та випадкові коливання (аномальні погодні явища). Це сприяє глибшому розумінню погодних умов та їх прогнозуванню.

3) ARIMA моделі: ARIMA (AutoRegressive Integrated Moving Average) — це популярна модель для аналізу та прогнозування часових рядів. Вона поєднує в собі три компоненти: авторегресію (AR), інтегрованість (I) та ковзне середнє (MA) (Рисунок 2.4). Модель ARIMA використовується для моделювання даних, які можуть бути нерівномірними або мати певні тенденції та сезонні коливання.

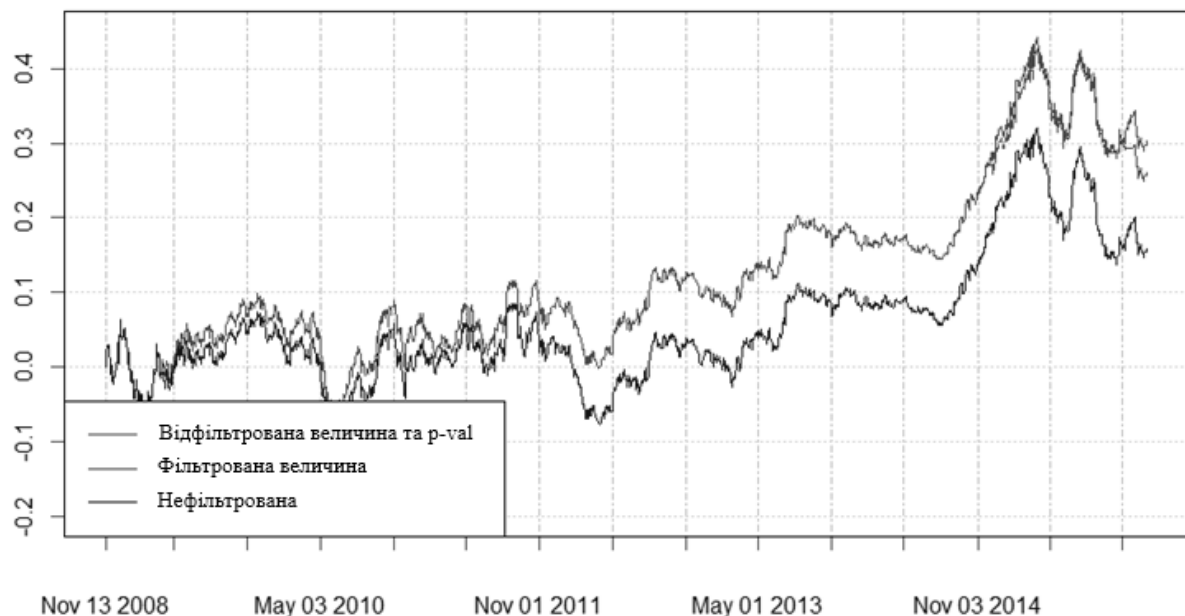


Рисунок 2.4 — Приклад роботи ARIMA

Компоненти моделі ARIMA

AR (авторегресійна частина):

Модель використовує залежність між поточним значенням ряду та його попередніми значеннями.

p — порядок авторегресії, що визначає кількість попередніх значень, що використовуються для прогнозу.

I (інтегрована частина):

Модель працює з різницевими рядами для досягнення стаціонарності.

d — порядок інтеграції, що визначає кількість разів, які потрібно застосувати різницювання для досягнення стаціонарності.

MA (частина ковзного середнього):

Модель використовує залежність між поточним значенням ряду та попередніми залишками помилок прогнозу.

q — порядок ковзного середнього, що визначає кількість попередніх помилок прогнозу, які використовуються для прогнозу.

Формула моделі ARIMA

Модель ARIMA(p, d, q) визначається наступним чином (2.8):

$$y_t = c + \phi_1 y_{t-1} + \phi_2 y_{t-2} + \dots + \phi_p y_{t-p} + \theta_1 \epsilon_{t-1} + \theta_2 \epsilon_{t-2} + \dots + \theta_q \epsilon_{t-q} + \epsilon_t \quad (2.8)$$

де y_t — значення ряду в момент часу t ;

c — константа;

$\phi_1, \phi_2, \dots, \phi_p$ — коефіцієнти авторегресійної моделі;

$\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_q$ — коефіцієнти моделі ковзного середнього;

ϵ_t — випадкова помилка в момент часу t .

Застосування в аналізі погодних даних

Модель ARIMA дозволяє ефективно аналізувати та прогнозувати погодні дані, враховуючи як довгострокові тенденції, так і короткострокові флуктуації. Це корисно для прогнозування температури, вологості, швидкості вітру та інших параметрів. ARIMA може бути застосована для короткострокових прогнозів, що допомагає приймати обґрунтовані рішення на основі аналізу історичних даних.

До просторового аналізу можна віднести наступні алгоритми.

4) Кригинг (Kriging) — це геостатистичний метод інтерполяції, який використовується для прогнозування значень у просторових даних (Рисунок 2.5). Він враховує як відстань, так і взаємну кореляцію між вимірюваними точками. Кригинг є потужним інструментом для просторового аналізу, наприклад, в екології, гірництві, метеорології та інших областях, де необхідно створювати точні карти розподілу значень на основі обмеженого числа вимірювань.

Основні компоненти кригінгу

Вибіркові дані: Набір вимірювань з відомими координатами та значеннями, які використовуються для прогнозування значень в інших місцях.

Коваріаційна або семіваріаційна функція: Функція, що описує кореляцію між вимірюваннями залежно від відстані між ними.

Система рівнянь кригінгу: Розв'язок системи рівнянь для отримання ваг, які використовуються для інтерполяції значень.

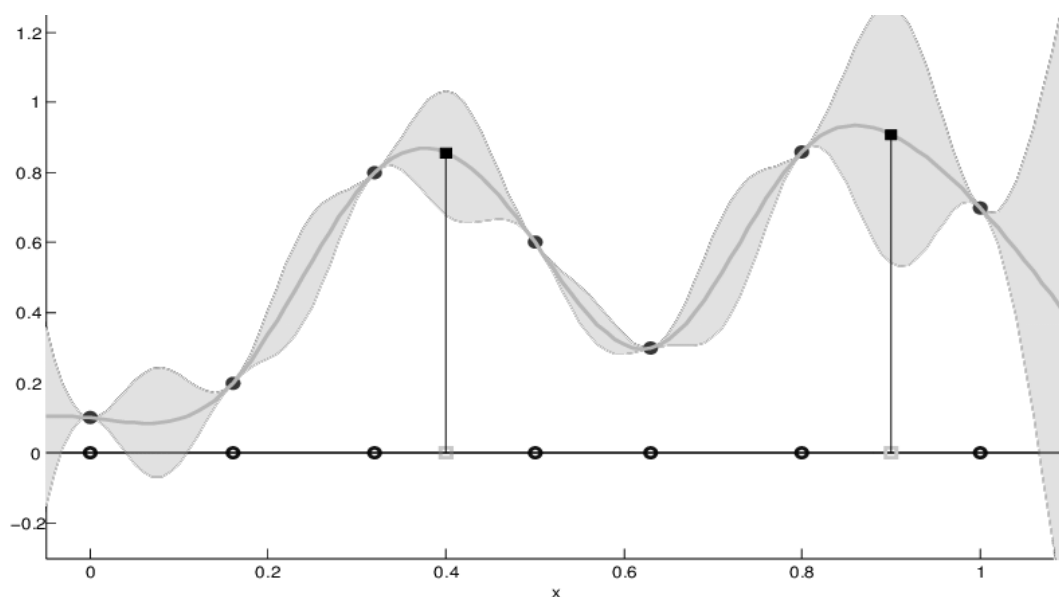


Рисунок 2.5 — Графік роботи Kriging

Типи кригінгу

Простий кригинг (Simple Kriging): Передбачає, що середнє значення даних відоме та є константою.

Звичайний кригинг (Ordinary Kriging): Передбачає, що середнє значення є невідомим і може змінюватися в просторі.

Універсальний кригинг (Universal Kriging): Дозволяє моделювати та враховувати тренди у даних.

Застосування в аналізі погодних даних

Кригинг є корисним для аналізу погодних даних, оскільки дозволяє створювати точні просторові карти розподілу температури, вологості, опадів та інших метеорологічних параметрів. Це особливо важливо для прогнозування погоди, моніторингу кліматичних змін та планування сільськогосподарських робіт.

Основні переваги кригінгу включають можливість враховувати просторову кореляцію даних та отримувати точні оцінки навіть при обмеженій кількості вимірювань.

До моделювання та прогнозування можна віднести наступні алгоритми.

5) Поведінкове моделювання (behavioral modeling) використовується для передбачення або аналізу поведінки складних систем на основі їх історичних даних та взаємодії між компонентами системи. У контексті погодних станцій поведінкове моделювання може використовуватися для аналізу та прогнозування погодних умов, враховуючи взаємодію різних погодних параметрів, таких як температура, вологість, тиск, швидкість вітру тощо.

Основні підходи до поведінкового моделювання

Математичні моделі: Використання диференціальних рівнянь для моделювання фізичних процесів, що визначають погодні умови.

Статистичні методи: Використання регресійних моделей, часових рядів, ARIMA, та інших статистичних методів для моделювання та прогнозування.

Машинне навчання та штучний інтелект: Використання алгоритмів машинного навчання, таких як нейронні мережі, дерева рішень, ансамблеві методи для виявлення складних взаємозв'язків у даних і створення прогнозних моделей.

Агентно-орієнтовані моделі: Використання моделей, де окремі "агенти" (наприклад, окремі атмосферні явища) взаємодіють між собою за певними правилами, щоб моделювати поведінку системи в цілому.

Використання поведінкового моделювання в аналізі погодних даних

Поведінкове моделювання дозволяє:

- передбачати майбутні погодні умови на основі історичних даних;
- аналізувати вплив різних погодних параметрів на один одного;
- покращувати розуміння складних взаємозв'язків у погодних системах;
- підтримувати прийняття рішень в аграрному секторі, енергетиці, транспорті та інших галузях, залежних від погодних умов.

Застосування сучасних методів машинного навчання та штучного інтелекту дозволяє створювати точні та надійні моделі для прогнозування погодних умов, що є важливим для багатьох сфер діяльності.

До аналізу аномалій можна віднести наступні алгоритми.

6) Статистичні методи: Z-оцінка (Z-score) є популярним статистичним методом для виявлення аномалій у наборі даних. Вона показує, наскільки далеко значення відхиляється від середнього в термінах стандартних відхилень (Рисунок 2.6). Цей метод є корисним для виявлення аномальних значень, які можуть суттєво відрізнятися від основної маси даних.

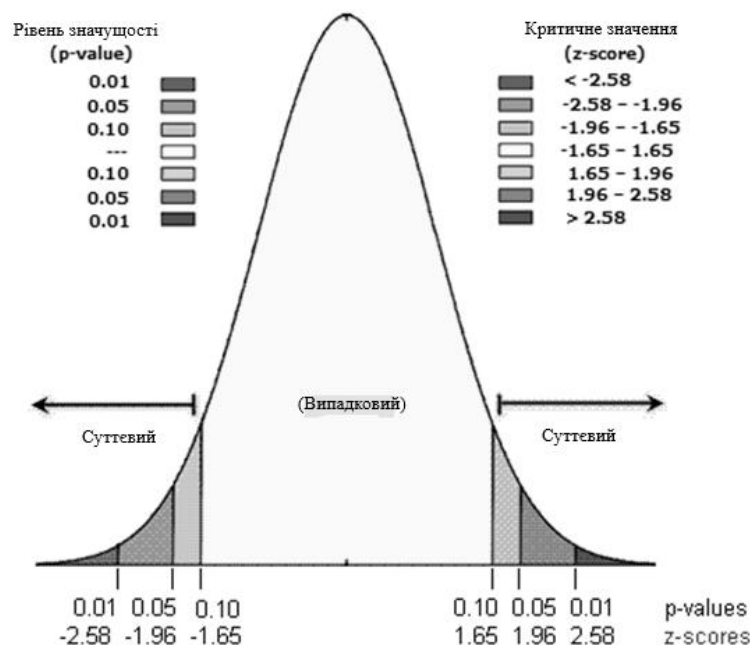


Рисунок 2.6 — Графік переходу P-value до Z-score

Формула Z-оцінки

Z-оцінка для значення X розраховується за формулою (2.9):

$$Z = \frac{(X - \mu)}{\sigma} \quad (2.9)$$

де X — значення, для якого розраховується Z-оцінка;

μ — середнє значення набору даних;

σ — стандартне відхилення набору даних.

Інтерпретація Z-оцінки

Z-оцінка близька до 0: Значення близьке до середнього значення.

Z-оцінка більше або менше 3 або — 3: Значення вважається аномальним, оскільки знаходиться на відстані більше трьох стандартних відхилень від середнього.

Застосування в аналізі погодних даних

Z-оцінка може бути корисною для аналізу погодних даних з метою:

- виявлення аномальних погодних умов, таких як надзвичайно високі або низькі температури, екстремальні опади тощо;
- моніторингу якості даних з погодних станцій;
- поліпшення точності прогнозів шляхом виявлення та обробки аномальних даних.

7) Методи машинного навчання: Isolation Forest (ізоляційний ліс) — це ефективний метод для виявлення аномалій, який базується на концепції ізоляції даних (Рисунок 2.7). Цей метод відрізняється від традиційних алгоритмів машинного навчання тим, що він спеціально розроблений для виявлення аномалій, а не для класифікації або регресії.

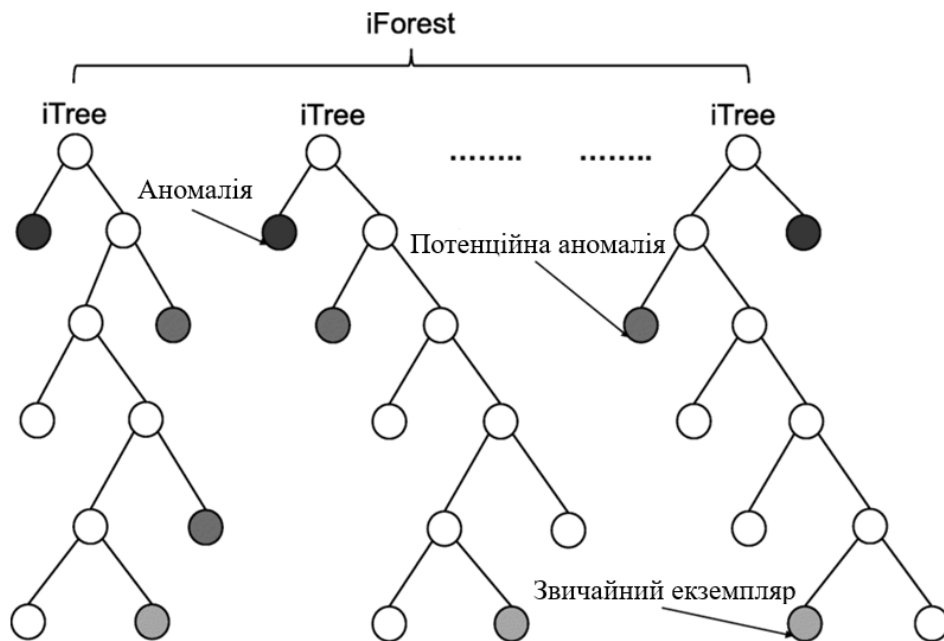


Рисунок 2.7 — Приклад роботи алгоритму Isolation Forest

Основна ідея Isolation Forest

Ізоляційний ліс працює за принципом побудови випадкових дерев (аналогічно випадковим лісам) для ізоляції кожного спостереження в наборі даних. Аномалії легше ізолювати, оскільки вони менш схожі на інші спостереження. В середньому, аномальні точки будуть ізольовані на меншій глибині дерева порівняно з нормальними точками.

Ключові кроки алгоритму Isolation Forest

Випадкове вибір підмножини ознак: Випадково вибираються ознаки, за якими буде виконуватися поділ даних.

Випадковий вибір значення розподілу для поділу: Випадково вибирається значення ознаки для поділу даних на дві частини.

Побудова дерев: Процес поділу повторюється рекурсивно, поки всі точки не будуть ізольовані або не буде досягнута максимальна глибина дерева.

Агрегація результатів: Глибина ізоляції кожної точки усереднюється по всіх деревах, і на основі цього значення обчислюється оцінка аномальності.

Isolation Forest є ефективним методом для виявлення аномалій у великих наборах даних. Він легко масштабується, не вимагає великих обчислювальних

ресурсів і добре працює з багатовимірними даними, що робить його корисним інструментом для аналізу погодних даних та інших застосувань.

До оцінки ефективності обробки отриманих даних можна віднести наступні алгоритми.

8) Метрики: MAE (Mean Absolute Error) або середня абсолютна помилка — це метрика, що використовується для оцінки точності прогнозів моделей. Вона обчислюється як середнє значення абсолютних різниць між фактичними значеннями та прогнозованими значеннями.

Формула для обчислення MAE виглядає наступним чином (2.10):

$$MAE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |y_i - \hat{y}_i| \quad (2.10)$$

де n — кількість спостережень;

y_i — фактичне значення;

$\hat{y}_i$ — прогнозоване значення.

Переваги MAE

Простота інтерпретації: MAE виражається в тих же одиницях вимірювання, що і початкові дані, що робить її легкою для інтерпретації.

Рівномірна обробка помилок: MAE однаково зважує всі помилки, тому великі помилки не мають непропорційно великого впливу.

Недоліки MAE

Менш чутлива до великих помилок: У порівнянні з метрикою RMSE (Root Mean Square Error), MAE менш чутлива до великих помилок, що може бути як перевагою, так і недоліком залежно від контексту.

Застосування MAE в аналізі погодних даних

MAE може бути корисним для оцінки точності прогнозів погодних умов:

- оцінка точності прогнозів температури, вологості, опадів тощо;
- порівняння різних моделей прогнозування для вибору найточнішої;
- виявлення систематичних помилок у прогнозах та їх корекція.

MAE є простою та ефективною метрикою для оцінки точності моделей прогнозування. Вона дозволяє легко інтерпретувати результати та порівнювати різні моделі. Завдяки своїй простоті та наочності, MAE часто використовується в аналізі даних, включаючи аналіз погодних умов та багато інших областей.

Використання цих методів дозволяє створити ефективну та точну систему відслідковування погодних умов, яка може надавати надійні прогнози та виявляти аномалії.

2.2 Переваги обраних методів

У цьому дослідженні було обрано три найбільш ефективні та практично застосовні моделі й алгоритми для аналізу та прогнозування метеорологічних даних: фільтр Калмана, STL-декомпозиція, та модель ARIMA. Їх вибір обґрунтований специфікою даних, що надходять із сенсорів погодної станції, а також вимогами до точності, надійності та стійкості до шумів.

Переваги фільтра Калмана

Фільтр Калмана був обраний як основний метод фільтрації та згладжування даних завдяки низці важливих переваг:

- працює в режимі реального часу, що дозволяє обробляти дані одразу після отримання з датчика;
- висока ефективність у зменшенні шумів, зокрема для датчиків температури та тиску, які мають низьку частоту зміни сигналу;
- адаптивність до змін у системі, що дозволяє коректно працювати в умовах нестабільних або зашумлених вимірювань;
- математична оптимальність: фільтр мінімізує середньоквадратичну похибку між прогнозом і вимірюваннями;
- мала обчислювальна складність, що важливо для мікроконтролера з обмеженими ресурсами.

Завдяки цим перевагам фільтр Калмана забезпечує підвищену точність показників, що є критичним для подальшої передачі даних через LoRaWAN.

Переваги STL-декомпозиції

STL (Seasonal-Trend decomposition using Loess) був обраний основним методом для аналізу часових рядів з таких причин:

- дозволяє виділити трендову, сезонну та залишкову компоненти, що забезпечує глибше розуміння поведінки метеорологічних параметрів;
- гнучкість у налаштуванні параметрів, можливість адаптації до різної сезонності (доба, тиждень, рік);
- стійкість до викидів: STL менш чутливий до аномалій порівняно з класичними методами;
- підходить для нерівномірних та неповних даних, що важливо в умовах втрат пакетів у LoRaWAN;
- можливість використання як попереднього етапу для прогнозних моделей (ARIMA, LSTM).

Завдяки використанню STL-декомпозиції система отримує структуровані та очищені дані для подальшого аналізу і прогнозування.

Переваги моделі ARIMA

Модель ARIMA (AutoRegressive Integrated Moving Average) була обрана для прогнозування погодних параметрів завдяки таким властивостям:

- висока точність короткострокових прогнозів, особливо для температури, вологості та тиску;
- можливість моделювання трендів і сезонності (у вигляді SARIMA);
- широке застосування в метеорології, добре досліджена методологія;
- працює навіть із невеликими наборами даних, що є корисним для нових станцій;
- мала обчислювальна складність, що дозволяє запускати модель на сервері в режимі реального часу.

ARIMA дозволяє прогнозувати параметри на 6—24 години вперед, що підвищує корисність системи для аграрних та інженерних застосувань.

2.3 Алгоритми роботи

Для створення станції необхідно розробити алгоритми для збору, передачі та обробки даних. Спочатку потрібно ініціалізувати всі підключені сенсори (температури, вологості, тиску, дощу, швидкості та напрямку вітру тощо) та перевірити їх справність. Після цього здійснюється збір даних з кожного сенсора з перевіркою достовірності даних та їх фільтрацією від шуму й аномалій. Зібрані дані агрегуються у відповідний формат (Рисунок 2.8).

Підготовка даних для передачі через LoRaWAN включає перетворення агрегованих даних у формат, який підходить для передачі через LoRaWAN. Після цього встановлюється з'єднання з LoRaWAN шлюзом і дані передаються через встановлений канал зв'язку з отриманням підтвердження про успішну передачу (Рисунок 2.9).

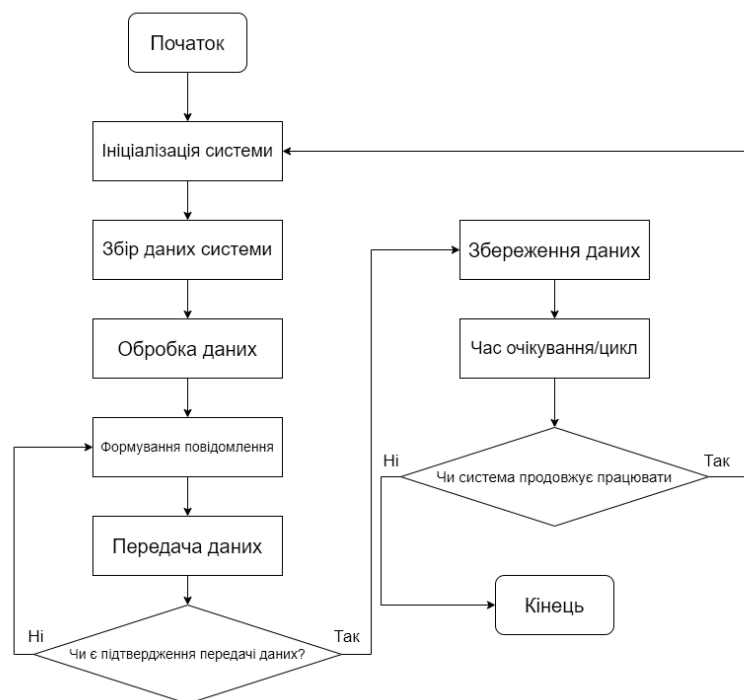


Рисунок 2.8 — Блок-схема алгоритму роботи системи (передавач)

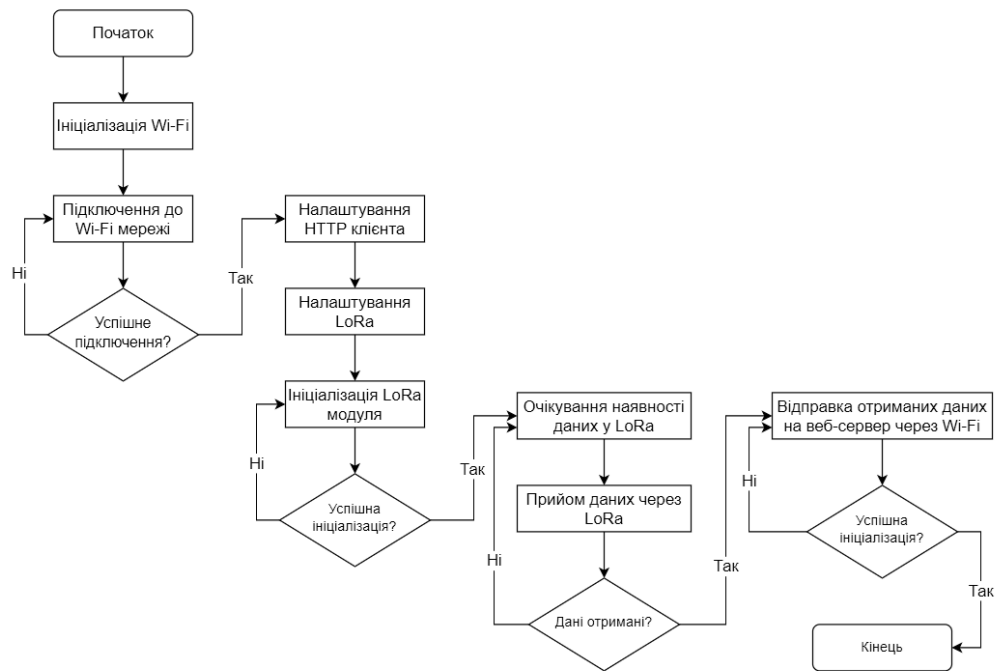


Рисунок 2.9 — Блок-схема алгоритму роботи системи (приймач)

Обробка даних включає прийняття даних, переданих через LoRaWAN, збереження отриманих даних у базі даних для подальшого аналізу, виконання аналізу даних для виявлення трендів та прогнозування погодних умов, а також відображення даних на інформаційних панелях або у вебдодатках.

3 ПРОЄКТУВАННЯ ТА РОЗРОБКА АПАРАТНО-ПРОГРАМНОГО КОМПЛЕКСУ

3.1 Вибір електронних компонентів

Під час розробки прототипу вибір комплектуючих є важливим етапом, який може впливати на час розробки, габарити та вартість прототипу, а також на його функціональні можливості. Для забезпечення успішного вибору компонентів, було проведено дослідження ринку електронних компонентів та їх аналогів, використання яких можливе в рамках даного проекту, що дозволило вибрати оптимальні комплектуючі.

3.1.1 Плати

1) Arduino Nano — це компактна плата на базі мікроконтролера ATmega328P, яка використовується для створення електронних проєктів. Вона має 14 цифрових пінів вводу/виводу (з яких 6 можуть використовуватись як PWM виходи), 8 аналогових входів, і працює на частоті 16 МГц. Плата може живитися від 7—12 В через Vin пін або через USB (Рисунок 3.1).

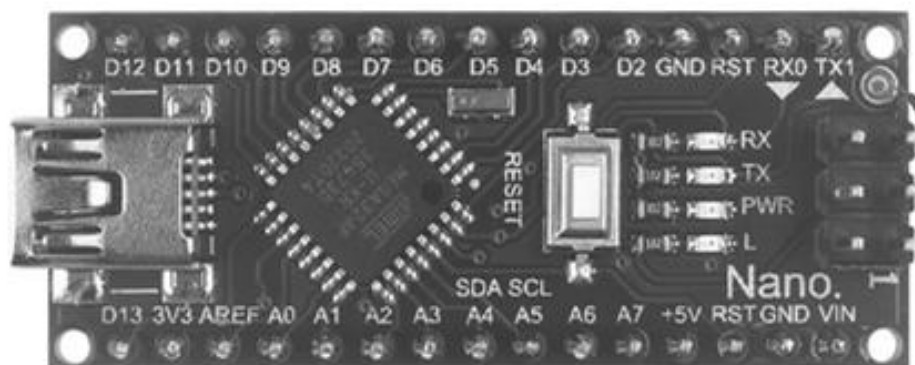


Рисунок 3.1 — Плата Arduino Nano

Мікроконтролер ATmega328P має 32 КБ флеш пам'яті, 2 КБ SRAM і 1 КБ EEPROM для зберігання програм і даних. Завантажувач Arduino, що займає 2 КБ флеш пам'яті, дозволяє легко завантажувати програми через USB.

Arduino Nano підтримує інтерфейси UART, I2C і SPI, що дозволяє підключати її до різних периферійних пристроїв. Цифрові і аналогові піни можуть використовуватися для підключення датчиків, світлодіодів, моторів та інших компонентів. Логіка плати працює на 5 В, але є також пін 3.3 В для живлення пристроїв, що працюють на нижчій напрузі.

Таблиця 3.1 — Характеристики плати Arduino Nano

Параметр	Значення
Мікроконтролер	ATmega328P
Архітектура	AVR
Кількість пінів вводу/виводу	14 (6 з них PWM)
Аналогові входи	8
Цифрові I/O пінів	22
Flash пам'ять	32 КБ (2 КБ використовуються завантажувачем)
SRAM	2 КБ
EEPROM	1 КБ
Тактова частота	16 МГц
Напруга живлення (V_{in})	7—12 В
Напруга живлення (пін 5V)	5 В
Напруга живлення (пін 3.3V)	3.3 В
Робоча напруга (логіка)	5 В
Максимальний струм пінів 3.3V	50 мА
Максимальний струм пінів I/O	40 мА на пін
Розміри	18 мм x 45 мм
Вага	близько 7 г
Інтерфейси зв'язку	UART, I2C, SPI

Плата програмується за допомогою Arduino IDE, яка забезпечує простий у використанні інтерфейс для написання, компіляції та завантаження програм.

Завдяки своїм компактним розмірам і широкій функціональності, Arduino Nano є популярним вибором для різноманітних електронних проектів, включаючи робототехніку, автоматизацію, інтернет речей (IoT) та інші інтерактивні системи.

2) Arduino Pro Mini — це компактна, економічна плата мікроконтролера, створена для проектів з обмеженим простором і енергоспоживанням. Вона базується на мікроконтролері ATmega328P і пропонує той самий функціонал, що й Arduino Nano, але без вбудованого USB-інтерфейсу, що дозволяє зменшити розміри плати. Для програмування Arduino Pro Mini необхідний зовнішній USB-to-Serial адаптер (Рисунок 3.2).

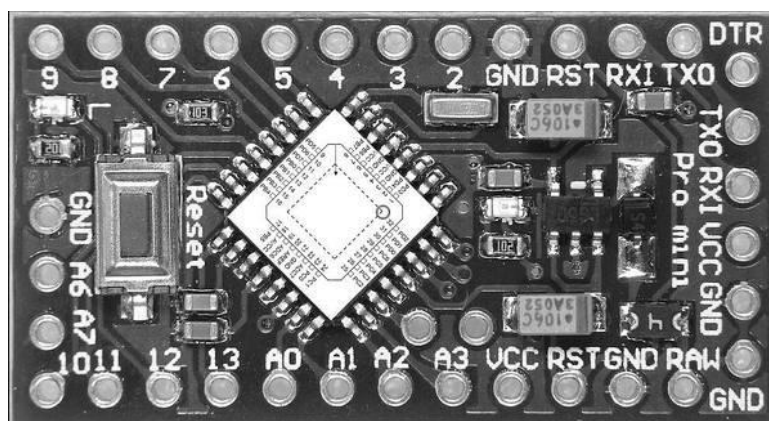


Рисунок 3.2 — Плата Arduino Pro Mini

Основні характеристики

Мікроконтролер ATmega328P, той самий мікроконтролер, що використовується в Arduino Nano та інших платах Arduino. Це забезпечує сумісність і надійність.

Плата має дуже компактні розміри — 18 мм х 33 мм, що дозволяє використовувати її в проектах з обмеженим простором.

Пам'ять Arduino Pro Mini має 32 КБ флеш-пам'яті для зберігання програм (2 КБ з яких використовуються завантажувачем), 2 КБ SRAM і 1 КБ EEPROM для зберігання постійних даних.

Плата має 14 цифрових пінів вводу/виводу (з яких 6 можуть використовуватись як PWM виходи) та 8 аналогових входів. Це дозволяє

підключати до неї різноманітні датчики, перемикачі, світлодіоди та інші компоненти.

Arduino Pro Mini може житися від 3.3 В або 5 В, залежно від версії плати. Вхідна напруга для живлення через Vin пін становить від 3.35 В до 12 В (для 5 В версії) та від 3.35 В до 6 В (для 3.3 В версії).

Плата працює на частоті 16 МГц (для 5 В версії) або 8 МГц (для 3.3 В версії), що забезпечує достатню швидкість для більшості завдань.

Завдяки відсутності вбудованого USB-конектора та стабілізатора напруги, плата має низьке енергоспоживання, що є важливим для проєктів з автономним живленням.

Підтримує UART, I2C та SPI інтерфейси для зв'язку з іншими пристроями та мікроконтролерами. Це робить її дуже гнучкою для інтеграції в різні системи.

Плата програмується за допомогою зовнішнього USB-to-Serial адаптера та Arduino IDE, що забезпечує простоту і інтуїтивно зрозумілий інтерфейс для написання, компіляції та завантаження програм.

Таблиця 3.2 — Технічні характеристики плати Arduino Pro Mini

Параметр	Значення
Мікроконтролер	ATmega328P
Розміри	18 мм x 33 мм
Пам'ять	32 КБ флеш, 2 КБ SRAM, 1 КБ EEPROM
Цифрові I/O піни	14 (6 з них PWM)
Аналогові входи	8
Тактова частота	16 МГц (5 В версія) або 8 МГц (3.3 В версія)
Напруга живлення	3.35—12 В (5 В версія), 3.35—6 В (3.3 В версія)
Робоча напруга (логіка)	5 В або 3.3 В залежно від версії

Параметр	Значення
Максимальний струм пінів I/O	40 мА на пін
Інтерфейси зв'язку	UART, I2C, SPI

Arduino Pro Mini широко використовується в проектах, де важливі компактні розміри та низьке енергоспоживання. Вона ідеально підходить для інтеграції в портативні пристрої, бездротові датчики, системи автоматизації, робототехніку та інші проекти, де необхідно забезпечити надійну роботу з мінімальними ресурсами.

3) ESP8266 — це потужний мікроконтролер з вбудованим Wi-Fi модулем, розроблений для забезпечення простого та ефективного бездротового з'єднання в проектах IoT (Інтернет речей). Відзначаючись високою продуктивністю і низьким енергоспоживанням, ESP8266 став дуже популярним серед розробників завдяки своїй доступній ціні та широким можливостям (Рисунок 3.3).

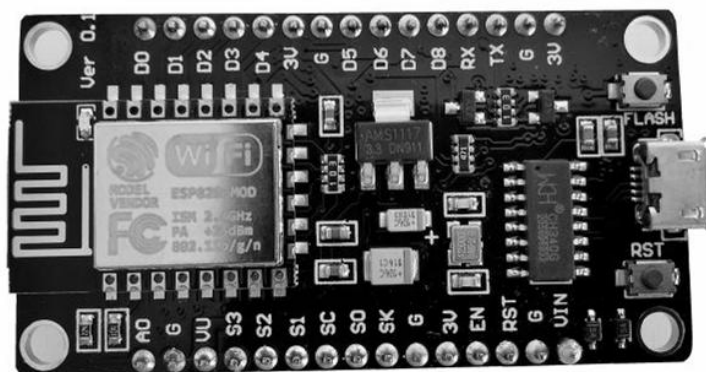


Рисунок 3.3 — Плата ESP8266

Основні характеристики

Мікроконтролер ESP8266 оснащений 32-бітним процесором Tensilica Xtensa LX106, що працює на частоті до 160 МГц. Це забезпечує достатню обчислювальну потужність для виконання складних завдань і обробки даних.

Вбудований Wi-Fi ESP8266 підтримує стандарти 802.11b/g/n, що дозволяє підключатися до бездротових мереж і забезпечує передачу даних зі швидкістю до 72.2 Мбіт/с.

Мікроконтролер має 32 КБ інструкційної RAM та 80 КБ користувацької RAM для зберігання даних під час виконання програм. Вбудована флеш-пам'ять може мати розмір від 512 КБ до 4 МБ залежно від моделі.

ESP8266 має до 17 загальних входів/виходів (GPIO), які можуть використовуватися для підключення різноманітних датчиків, акторів та інших периферійних пристроїв.

ESP8266 відомий своєю енергоефективністю. У режимі очікування (deep sleep) він споживає всього кілька мікроамперів, що робить його ідеальним для автономних пристроїв, що працюють від батарей.

Підтримує різноманітні інтерфейси, такі як UART, SPI, I2C, I2S, PWM, ADC та SDIO. Це забезпечує гнучкість у підключенні до інших мікроконтролерів та периферійних пристроїв.

ESP8266 може програмуватися за допомогою різних середовищ розробки, таких як Arduino IDE, PlatformIO, та інші. Це робить його доступним для широкого кола розробників, незалежно від рівня їхньої підготовки.

Таблиця 3.3 — Технічні характеристики мікроконтролера ESP8266

Параметр	Значення
Процесор	Tensilica Xtensa LX106 32-біт
Тактова частота	До 160 МГц
Пам'ять (RAM)	32 КБ інструкційної, 80 КБ користувацької
Флеш-пам'ять	Від 512 КБ до 4 МБ
Wi-Fi	802.11b/g/n, 2.4 ГГц
GPIO	До 17 пінів
Аналоговий ввід (ADC)	1 канал (10-біт)

Параметр	Значення
Інтерфейси зв'язку	UART, SPI, I2C, I2S, PWM, ADC, SDIO
Енергоспоживання (deep sleep)	<10 μ A
Робоча напруга	3.0 В—3.6 В
Розміри	Залежить від варіанту модуля, зазвичай 24 мм x 16 мм (ESP-12E/F)

ESP8266 використовується в різноманітних IoT проектах, таких як розумні будинки, системи моніторингу та контролю, бездротові датчики, розумне освітлення, автоматизація процесів та багато інших. Завдяки своїй потужності, вбудованому Wi-Fi та гнучкості, ESP8266 став основою для багатьох інноваційних рішень, які потребують надійного бездротового з'єднання та низького енергоспоживання.

3.1.2 Датчики

1) Датчик KY-015 (DHT11) є цифровим датчиком температури та вологості, що широко використовується в різних електронних проектах завдяки своїй простоті використання та доступній ціні. Цей датчик ідеально підходить для створення метеостанцій, систем управління мікрокліматом, розумного дому та інших пристроїв, які потребують вимірювання температури та вологості повітря (Рисунок 3.4).

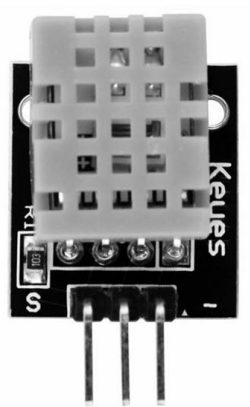


Рисунок 3.4 — Датчик KY-015 (DHT11)

KY-015 має компактні розміри (15.5 мм x 12 мм x 5.5 мм) і працює в температурному діапазоні від 0 до 50 °C з точністю ± 2 °C. Він здатний вимірювати відносну вологість у діапазоні від 20 % до 90 % RH (відносна вологість) з точністю ± 5 % RH. Ці параметри дозволяють використовувати датчик у більшості стандартних умов навколишнього середовища.

Датчик використовує полімідний резистор для вимірювання вологості та терморезистор (NTC) для вимірювання температури. Полімідний резистор змінює свій опір залежно від вологості повітря, що дозволяє мікроконтролеру датчика перетворювати ці зміни в електричний сигнал. Терморезистор змінює свій опір залежно від температури, і ці дані також обробляються мікроконтролером, який перетворює їх у цифровий сигнал.

Для зв'язку з мікроконтролером або іншими пристроями використовується однодротовий інтерфейс, що значно спрощує інтеграцію датчика в різні проекти. Після отримання запиту від мікроконтролера, датчик посилає 40-бітний пакет даних, який складається з 16 біт для вологості (ціле та дробове значення), 16 біт для температури (ціле та дробове значення) та 8 біт контрольної суми для перевірки правильності передачі даних.

Однією з основних переваг KY-015 є його низьке енергоспоживання. Робочий струм під час вимірювання складає лише 0.3 мА, а в режимі очікування — 60 мкА, що робить його відмінним вибором для проектів з обмеженим енергоспоживанням, таких як пристрої, що працюють від батарей.

Датчик KY-015 виконує вимірювання кожні 2 секунди, що дозволяє отримувати актуальні дані про температуру та вологість у реальному часі. Завдяки своїй простоті використання та надійності, цей датчик є популярним серед розробників як для навчальних проектів, так і для професійних систем моніторингу.

Таблиця 3.4 — Характеристики датчика KY-015

Параметр	Значення
Модель	KY-015 (DHT11)
Тип датчика	Цифровий датчик температури та вологості
Розміри	15.5 мм x 12 мм x 5.5 мм
Температурний діапазон	0—50 °C
Точність вимірювання температури	±2 °C
Відносна вологість	20—90 % RH
Точність вимірювання вологості	±5 % RH
Напруга живлення	3.3—5.5 V
Робочий струм (вимірювання)	0.3 mA
Робочий струм (очікування)	60 мкА
Час відповіді	2 секунди
Вихідний сигнал	Цифровий однодротовий інтерфейс
Протокол передачі даних	Протокол власної розробки DHT

2) Датчик BMP280 — це високоточний цифровий сенсор, розроблений для вимірювання атмосферного тиску та температури. Цей датчик широко використовується в метеостанціях, висотомірах, системах навігації та інших пристроях, де необхідно точно вимірювати атмосферний тиск і температуру (Рисунок 3.5).

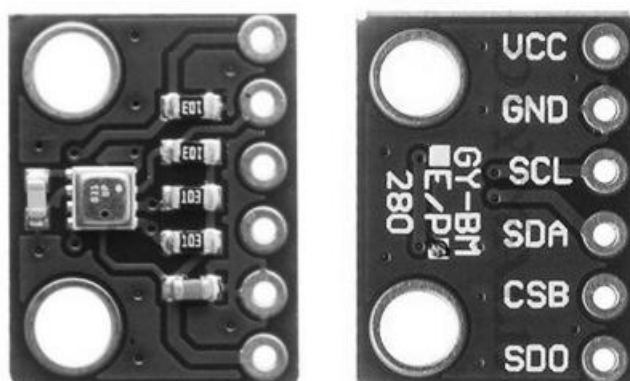


Рисунок 3.5 — Датчик BMP280

BMP280 базується на мікроелектромеханічній системі (MEMS) і має надзвичайно високу чутливість і точність. Він працює в температурному діапазоні від $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ до $+85\text{ }^{\circ}\text{C}$ з точністю $\pm 1\text{ }^{\circ}\text{C}$. Діапазон вимірювання тиску становить від 300 до 1100 гПа (гектопаскалів) з точністю ± 1 гПа. Це робить його ідеальним для вимірювання висоти в діапазоні до 9 км над рівнем моря з точністю до кількох метрів.

Датчик має компактні розміри (2.0 мм x 2.5 мм x 0.95 мм), що дозволяє легко інтегрувати його у портативні пристрої. BMP280 використовує цифровий інтерфейс I2C або SPI для зв'язку з мікроконтролером або іншими хост-пристроями, що забезпечує простоту підключення та зчитування даних.

Модуль має низьке енергоспоживання, що є критичним для багатьох додатків з обмеженим енергоживленням, таких як пристрої, що працюють на батареях. Під час вимірювань датчик споживає лише 2.7 мкА в режимі очікування і до 720 мкА під час активної роботи, що дозволяє використовувати його у пристроях з довгим терміном автономної роботи.

BMP280 підтримує різні режими роботи, включаючи нормальний, форсований і режим очікування, що дозволяє налаштовувати його роботу відповідно до потреб проекту. У нормальному режимі датчик проводить вимірювання періодично, у форсованому — за запитом, а в режимі очікування — споживає мінімальну кількість енергії, очікуючи на нові команди.

Барометричний сенсор BMP280 забезпечує високу точність вимірювань завдяки вбудованій функції компенсації температури, яка автоматично коригує значення тиску залежно від поточної температури. Це дозволяє отримувати надійні та точні дані навіть за змінних умов навколишнього середовища.

Таблиця 3.5 — Характеристики датчика BMP-280

Параметр	Значення
Модель	BMP280

Параметр	Значення
Модель	Цифровий датчик атмосферного тиску та температури
Розміри	2.0 мм x 2.5 мм x 0.95 мм
Температурний діапазон	—40 °C до +85 °C
Точність вимірювання температури	±1 °C
Діапазон вимірювання тиску	300—1100 гПа
Точність вимірювання тиску	±1 гПа
Напруга живлення	1.71—3.6 В
Струм споживання	2.7 мкА (в режимі очікування)
Час відгуку	1 мс
Вихідний сигнал	Цифровий інтерфейс I2C або SPI
Протокол передачі даних	Інтерфейс I2C або SPI для зчитування даних

Завдяки своїм високим технічним характеристикам та надійності, BMP280 знайшов широке застосування у різних сферах, таких як метеорологія, авіація, геодезія, мобільні пристрої, розумні будинки та інші системи, де необхідне точне вимірювання атмосферного тиску та температури.

3) BME280 — це високоточний цифровий сенсор, розроблений для вимірювання атмосферного тиску, вологості та температури. Вироблений компанією Bosch Sensortec, цей датчик є ідеальним рішенням для додатків в області метеорології, інтернету речей (IoT), систем автоматизації та розумних будинків. BME280 поєднує в собі три різних сенсори в одному компактному корпусі, що значно зменшує розмір та спрощує інтеграцію в електронні системи (Рисунок 3.6).



Рисунок 3.6 — Датчик BME280

Основні характеристики

BME280 здатен вимірювати атмосферний тиск у діапазоні від 300 до 1100 гПа з високою точністю ± 1 гПа. Це дозволяє використовувати датчик для точного вимірювання висоти та прогнозування погоди.

Датчик вимірює відносну вологість у діапазоні від 0 % до 100 % RH з точністю ± 3 % RH. Це робить його корисним для додатків, що потребують точного контролю вологості, таких як HVAC системи та розумні будинки.

BME280 вимірює температуру в діапазоні від -40 °C до $+85$ °C з точністю ± 1 °C. Це дозволяє використовувати його у різноманітних кліматичних умовах.

BME280 підтримує два цифрових інтерфейси — I2C і SPI, що дозволяє легко інтегрувати його в різні мікроконтролерні системи.

Датчик спроектований з урахуванням енергоефективності, що робить його придатним для портативних і автономних пристроїв.

Таблиця 3.6 — Технічні характеристики датчика BME280

Параметр	Значення
Діапазон вимірювання тиску	300-1100 гПа
Точність вимірювання тиску	± 1 гПа
Діапазон вимірювання вологості	0 %-100 % RH
Точність вимірювання вологості	± 3 % RH
Діапазон вимірювання температури	-40°C до $+85^{\circ}\text{C}$

Параметр	Значення
Точність вимірювання температури	$\pm 1^{\circ}\text{C}$
Інтерфейси	I2C (до 3.4 МГц), SPI (до 10 МГц)
Напруга живлення	1.71-3.6 В
Енергоспоживання	0.1 мА в режимі очікування, до 0.65 мА в активному режимі
Робоча температура	-40°C до $+85^{\circ}\text{C}$
Розміри	2.5 мм x 2.5 мм x 0.93 мм

BME280 ідеально підходить для застосувань, де необхідно вимірювати тиск, вологість та температуру з високою точністю та низьким енергоспоживанням. Він використовується в метеостанціях, системах HVAC, розумних будинках, портативних пристроях, системах моніторингу навколишнього середовища та інших IoT проектах. Завдяки компактним розмірам і гнучким інтерфейсам, BME280 легко інтегрується в будь-які електронні системи, забезпечуючи надійні та точні вимірювання.

4) DHT22 (також відомий як AM2302) — це високоточний цифровий датчик, призначений для вимірювання температури та вологості. Завдяки своїй точності, надійності та простоті використання, DHT22 є популярним вибором для багатьох додатків, включаючи системи моніторингу клімату, розумні будинки та проекти Інтернету речей (IoT) (Рисунок 3.7).



Рисунок 3.7 — Датчик AM2302 (DHT22)

Основні характеристики

DHT22 вимірює температуру в діапазоні від $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ до $+80\text{ }^{\circ}\text{C}$ з високою точністю $\pm 0.5\text{ }^{\circ}\text{C}$. Це дозволяє використовувати датчик у різноманітних кліматичних умовах.

Датчик вимірює відносну вологість у діапазоні від 0 % до 100 % RH з точністю $\pm 2\text{--}5\text{ \% RH}$, забезпечуючи точний контроль вологості в навколишньому середовищі.

DHT22 використовує однодротовий цифровий інтерфейс для передачі даних, що спрощує його інтеграцію з мікроконтролерами та іншими пристроями.

Датчик споживає лише кілька міліампер струму під час вимірювання, що робить його придатним для використання в автономних системах з живленням від батарей.

DHT22 має вбудовану функцію калібрування та компенсації температури, що забезпечує стабільність та надійність вимірювань навіть у складних умовах.

Таблиця 3.7 — Технічні характеристики датчика DHT22 (AM2302)

Параметр	Значення
Діапазон вимірювання температури	$-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ до $+80\text{ }^{\circ}\text{C}$
Точність вимірювання температури	$\pm 0.5\text{ }^{\circ}\text{C}$
Діапазон вимірювання вологості	0 %-100 % RH
Точність вимірювання вологості	$\pm 2\text{--}5\text{ \% RH}$
Інтерфейс	Однодротовий цифровий
Частота вибірки	0.5 Гц (одне вимірювання кожні 2 секунди)
Напруга живлення	3.3-6 В
Робочий струм (вимірювання)	1.5 мА
Робочий струм (очікування)	40-50 мкА
Розміри	15.1 мм x 25 мм x 7.7 мм
Вага	близько 2.4 г

DHT22 (AM2302) ідеально підходить для використання в додатках, де необхідне точне вимірювання температури та вологості. Він широко використовується в метеостанціях, системах контролю клімату, розумних будинках, системах HVAC, сільському господарстві та інших сферах, де важливий контроль умов навколишнього середовища. Завдяки своєму цифровому виходу та простоті підключення, DHT22 є універсальним інструментом для розробників електронних проектів.

3.1.3 Модулі LoRaWAN

1) RFM95W — це високочутливий радіомодуль, розроблений для бездротового зв'язку на великі відстані за допомогою технології LoRa (Long Range). Він працює в частотних діапазонах 868 МГц, що робить його придатним для використання в багатьох країнах, враховуючи місцеві регуляторні вимоги (Рисунок 3.8).

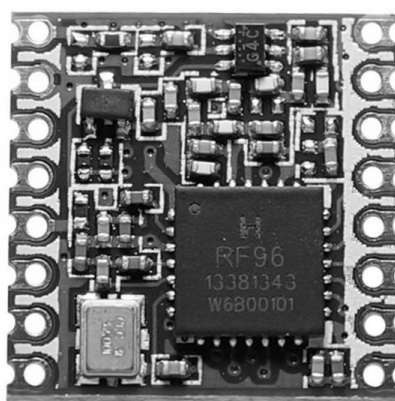


Рисунок 3.8 — Модуль RFM95W

Модуль забезпечує надійну передачу даних з низьким енергоспоживанням, що є особливо важливим для додатків Інтернету речей (IoT). Завдяки LoRa модуляції, RFM95W має високу чутливість приймача до -148 дБм, що дозволяє передавати дані на значні відстані навіть за умов слабого сигналу. Це робить його ідеальним для систем моніторингу навколишнього середовища, розумних міст, сільського господарства та інших додатків, де необхідний надійний зв'язок на великих відстанях.

RFM95W підтримує кілька типів модуляції, включаючи FSK, GFSK та MSK, що розширює його застосування в різних комунікаційних протоколах. Модуль використовує SPI інтерфейс для з'єднання з мікроконтролером або іншими хост-пристроями, що забезпечує швидку та ефективну передачу даних.

Завдяки компактним розмірам (16 мм x 16 мм x 2.8 мм), модуль легко інтегрується в різні електронні пристрої та системи. Він має низьке енергоспоживання, споживаючи до 120 мА під час передачі та лише 0.1 мА в режимі очікування, що робить його ідеальним для пристроїв з обмеженим енергоспоживанням, таких як датчики та інші пристрої IoT, які працюють від батарей.

Вихідна потужність модуля досягає +20 дБм, що забезпечує надійний зв'язок навіть у складних умовах. Модуль оснащений 64 байтами FIFO пам'яті для буферизації даних під час передачі та прийому, що допомагає забезпечити безперебійну роботу без втрат даних.

Таблиця 3.8 — Характеристики модуля RFM95W

Параметр	Значення
Модель	RFM95W
Частотний діапазон	868 МГц
Модуляція	LoRa, FSK, GFSK, MSK
Вихідна потужність	До +20 дБм
Чутливість приймача	До -148 дБм
Ширина смуги пропускання	7.8 кГц до 500 кГц
Напруга живлення	1.8-3.7 В
Робочий струм (передача)	120 мА (максимум)
Робочий струм (очікування)	0.1 мА
Інтерфейс зв'язку	SPI
Робоча температура	-40 °C до +85 °C
Розміри	16 мм x 16 мм x 2.8 мм

Параметр	Значення
Пам'ять FIFO	64 байт

Завдяки своїм характеристикам, RFM95W широко використовується у додатках, де необхідно забезпечити надійний бездротовий зв'язок на великі відстані з мінімальним енергоспоживанням. Це включає системи моніторингу, розумні міста, сільське господарство, логістику та багато інших сфер, де важливі надійність та ефективність зв'язку.

2) RN2483 — це потужний і енергоефективний LoRaWAN модуль, розроблений компанією Microchip Technology, який забезпечує надійний бездротовий зв'язок на великі відстані. Цей модуль є ідеальним рішенням для створення Інтернету речей (IoT) і додатків, де необхідно забезпечити довготривале автономне живлення та стабільний зв'язок (Рисунок 3.9).



Рисунок 3.9 — Модуль RN2483

Основні характеристики

RN2483 повністю підтримує LoRaWAN класу А і С, що дозволяє використовувати його у мережах LoRaWAN, забезпечуючи надійний зв'язок з високою дальністю.

Модуль працює в частотних діапазонах 433 МГц і 868 МГц (європейські стандарти), що дозволяє використовувати його в різних регіонах з відповідними частотними діапазонами.

RN2483 відзначається дуже низьким енергоспоживанням, що робить його ідеальним для пристроїв, що працюють від батарей і потребують довготривалого автономного живлення.

Модуль має простий інтерфейс UART для підключення до мікроконтролерів, що спрощує його інтеграцію у різні проекти та системи.

Модуль може використовувати зовнішню антену для покращення якості сигналу та збільшення дальності зв'язку.

Завдяки компактним розмірам, RN2483 легко інтегрується в різні пристрої, зменшуючи загальний розмір кінцевого продукту.

Таблиця 3.9 — Технічні характеристики модуля RN2483

Параметр	Значення
Частотний діапазон	433 МГц, 868 МГц
Протокол зв'язку	LoRaWAN клас А і С
Передавальна потужність	До +14 dBm
Чутливість приймача	До -148 dBm
Енергоспоживання (передача)	38 мА (максимум)
Енергоспоживання (прийом)	15 мА
Енергоспоживання (сплячий режим)	<1 мкА
Інтерфейс	UART
Напруга живлення	2.1-3.6 В
Розміри	17.8 мм x 26.3 мм x 3 мм
Антенa	Зовнішня антена

RN2483 ідеально підходить для застосувань у сфері Інтернету речей (IoT), де важливо забезпечити надійний бездротовий зв'язок на великі відстані з мінімальним енергоспоживанням. Це включає моніторинг навколишнього середовища, розумні міста, сільське господарство, автоматизацію будинків, промисловий контроль та інші додатки, де важливо забезпечити стабільний та довготривалий зв'язок з мінімальними витратами енергії. Завдяки своїм

характеристикам, RN2483 є відмінним вибором для розробників, які шукають надійний та енергоефективний LoRaWAN модуль для своїх проєктів.

3) SX1262 — це високопродуктивний і енергоефективний LoRa модем, розроблений компанією Semtech. Модуль забезпечує надійний бездротовий зв'язок на великі відстані з використанням технології LoRa, що робить його ідеальним рішенням для проєктів Інтернету речей (IoT), де важливо забезпечити довготривале автономне живлення та стабільний зв'язок (Рисунок 3.10).

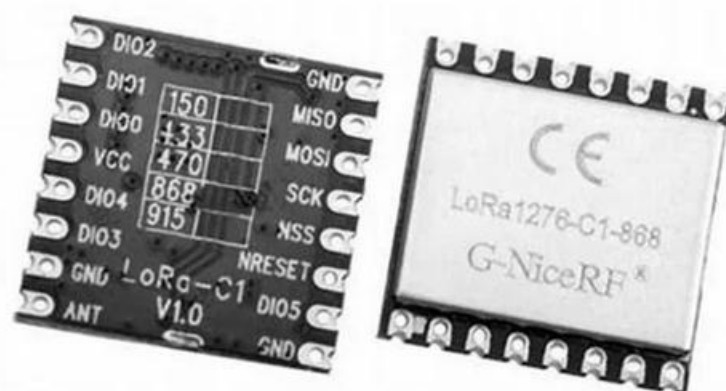


Рисунок 3.10 — Модуль SX1262

Основні характеристики

SX1262 використовує технологію LoRa для забезпечення зв'язку на великі відстані з низьким енергоспоживанням. Це робить його ідеальним для додатків IoT, таких як розумні міста, сільське господарство, моніторинг навколишнього середовища та інші.

Модуль працює в широкому частотному діапазоні від 150 МГц до 960 МГц, що дозволяє використовувати його у різних регіонах з відповідними частотними діапазонами.

SX1262 має дуже низьке енергоспоживання, що робить його ідеальним для пристроїв, що працюють від батарей і потребують довготривалого автономного живлення.

Завдяки високій чутливості приймача до -148 дБм та передавальній потужності до $+22$ дБм, модуль забезпечує надійний зв'язок на великих відстанях.

Модуль підтримує різні модуляції, включаючи LoRa, FSK, GFSK та MSK, що дозволяє налаштовувати його відповідно до потреб конкретного додатка.

Таблиця 3.10 — Технічні характеристики модуля SX1262

Параметр	Значення
Частотний діапазон	150 МГц-960 МГц
Протокол зв'язку	LoRa, FSK, GFSK, MSK
Передавальна потужність	До +22 дБм
Чутливість приймача	До -148 дБм
Енергоспоживання (передача)	22 мА @ +13 дБм, 24 мА @ +22 дБм
Енергоспоживання (прийом)	4.6 мА
Енергоспоживання (сплячий режим)	<1.5 мкА
Інтерфейси	SPI
Напруга живлення	1.8-3.7 В
Робоча температура	-40°C до +85°C
Розміри	4 мм x 4 мм x 0.85 мм
Антенa	Зовнішня антена

SX1262 є відмінним вибором для додатків IoT, де необхідно забезпечити надійний бездротовий зв'язок на великі відстані з мінімальним енергоспоживанням. Це включає розумні міста, моніторинг навколишнього середовища, сільське господарство, автоматизацію будинків, промисловий контроль та інші додатки. Завдяки своїм характеристикам та гнучкості налаштувань, SX1262 забезпечує стабільний і ефективний зв'язок, роблячи його ідеальним для широкого спектру проєктів.

Підсумки вибору компонентів

Обрано компоненти Arduino Nano, KY-015 (DHT11), BMP280, RFM95W та ESP8266 через їх дешевизну та відповідність потребам проєкту.

Arduino Nano обраний завдяки своїй компактності, простоті використання, низькій вартості та широкій підтримці спільноти. Він легко програмується через

USB за допомогою Arduino IDE, що спрощує розробку проєктів. Хоча він і не є найпотужнішим мікроконтролером, його продуктивність достатня для більшості IoT проєктів.

KY-015 (DHT11) вибраний через свою простоту інтеграції, доступність та низьке енергоспоживання. Він використовує однопровідний інтерфейс, що спрощує підключення до мікроконтролера, і дозволяє вимірювати базові параметри, такі як температура та вологість, що важливо для погодних станцій. Хоча він менш точний, ніж інші датчики, його невисока ціна робить його ідеальним для бюджетних проєктів.

BMP280 обраний через високу точність вимірювання атмосферного тиску та температури, що дозволяє об'єднати кілька функцій в одному датчику. Він також має низьке енергоспоживання, що робить його ідеальним для портативних пристроїв, а його малий розмір сприяє легкій інтеграції в компактні проєкти.

RFM95W вибраний завдяки своїй здатності передавати дані на великі відстані (до 15 км в умовах прямої видимості) завдяки LoRa модуляції. Він має низьке енергоспоживання, що дозволяє використовувати його в автономних додатках, і високу чутливість приймача до -148 дБм, що забезпечує роботу навіть в умовах слабого сигналу. Підтримка різних режимів модуляції та широкий діапазон частот (868 МГц) роблять його гнучким у налаштуванні та використанні в різних регіонах.

ESP8266 є потужним і недорогим модулем для підключення до WiFi-мереж. Він підтримує всі основні протоколи TCP/IP, що дозволяє легко інтегрувати його в будь-який IoT проєкт для передачі даних на веб-сервери. Завдяки своїй доступності та широкій підтримці в спільноті розробників, ESP8266 забезпечує просту і ефективну реалізацію бездротового зв'язку в проєктах.

Таким чином, вибрані компоненти забезпечують оптимальний баланс між функціональністю, вартістю та простотою інтеграції, що робить їх ідеальним вибором для проєкту.

3.2 Підключення компонентів

Для схеми підключення компонентів системи був використаний сервіс Fritzing.

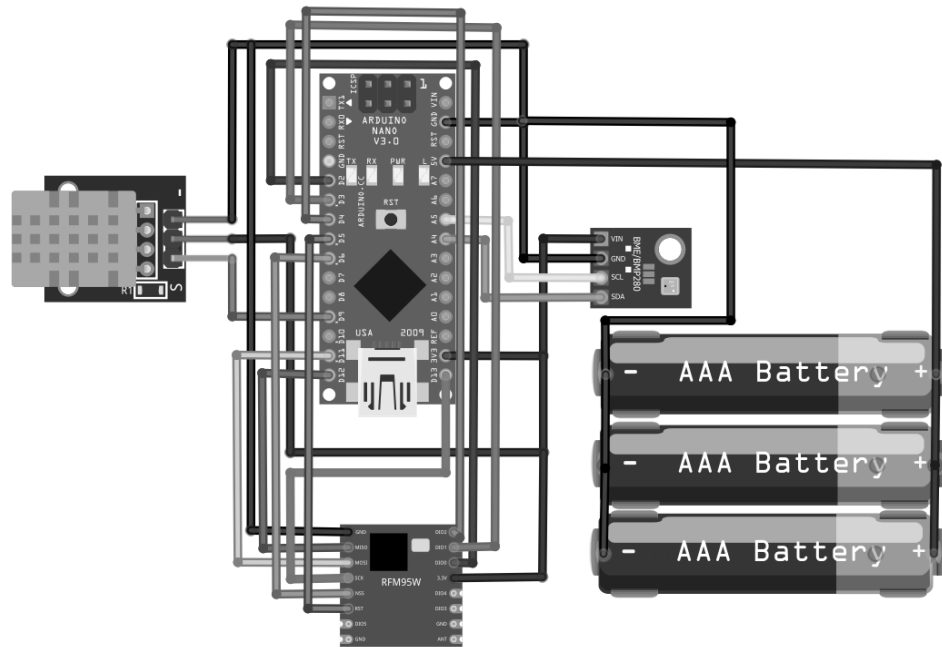


Рисунок 3.11 — Схема системи (передавач)

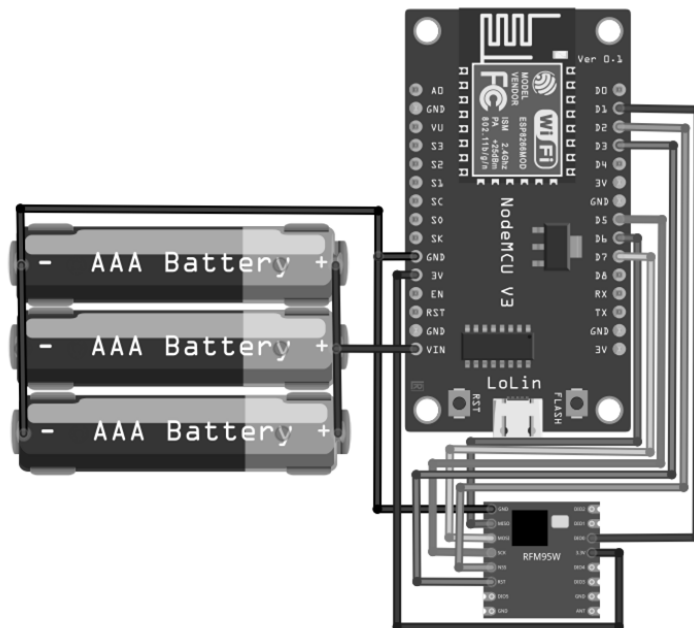


Рисунок 3.12 — Схема системи (приймач)

1) Підключення системи (передавач) (Рисунок 3.11)

Arduino Nano з LoRa та датчиками:

Підключення до Arduino Nano виконано за допомоги кабелів для макетних плат (мама-мама) (Рисунок 3.13).

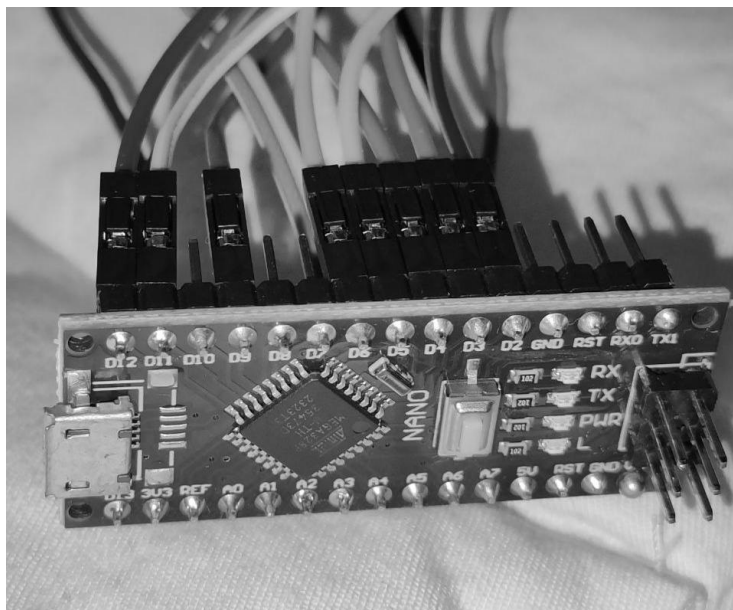


Рисунок 3.13 — Підключення до плати Arduino Nano

Підключення LoRa модуль RFM95W (Рисунок 3.14)

GND — GND: Підключення до землі для завершення електричного кола.

3.3V — 3V3: Подача живлення на модуль (3.3V).

MISO — D12: Пін MISO (Master In Slave Out) використовується для передачі даних від модуля RFM95W до Arduino.

MOSI — D11: Пін MOSI (Master Out Slave In) використовується для передачі даних від Arduino до модуля RFM95W.

SCK — D13: Пін SCK (Serial Clock) використовується для синхронізації передачі даних між Arduino та RFM95W.

NSS — D6: Пін NSS (Slave Select) використовується для вибору модуля RFM95W як активного пристрою на SPI шині.

RESET — D5: Пін RESET використовується для скидання модуля.

DIO0 — D2: Пін DIO0 використовується для сигналізації подій, таких як завершення передачі або прийому даних.

DIO1 — D3: Пін DIO1 також може використовуватися для сигналізації додаткових подій.

DIO2 — D4: Пін DIO2 використовується для сигналізації подій.

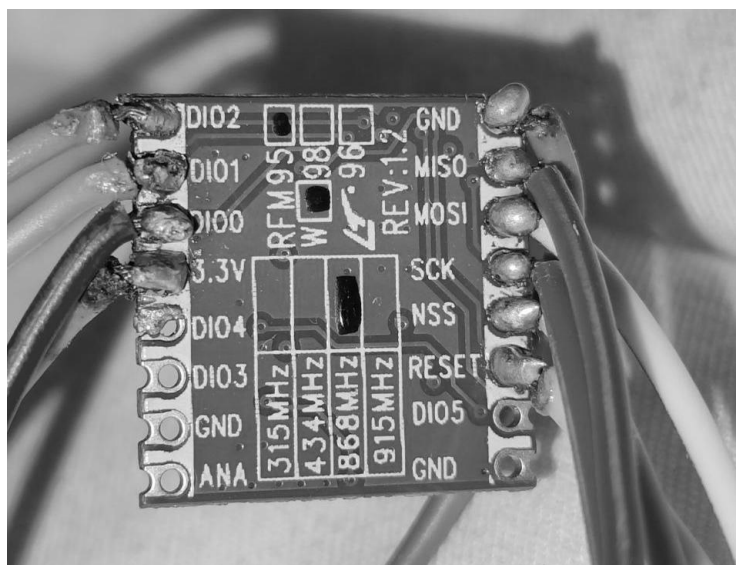


Рисунок 3.14 — Підключення до модуля RFM95W

LoRa модуль RFM95W: Використовує пін MISO, MOSI та SCK, тому що ці піни є стандартними для SPI (Serial Peripheral Interface) зв'язку, який забезпечує високошвидкісну передачу даних між мікроконтролером та периферійними пристроями.

Пін NSS використовується для вибору активного пристрою на SPI шині, що дозволяє мікроконтролеру вибрати, з яким пристроєм обмінюватися даними.

Піни DIO0, DIO1, та DIO2 використовуються для сигналізації подій, що дозволяє мікроконтролеру знати, коли передача або прийом даних завершено.

Пін RESET використовується для скидання модуля, що є необхідним для його початкового налаштування.

Підключення KY-015 (DHT11) (Рисунок 3.15)

GND — GND: Підключення до землі.

VCC — 3V3: Подача живлення на датчик (3.3V).

S — D9: Пін даних підключено до цифрового входу D9 на Arduino для зчитування даних з датчика.

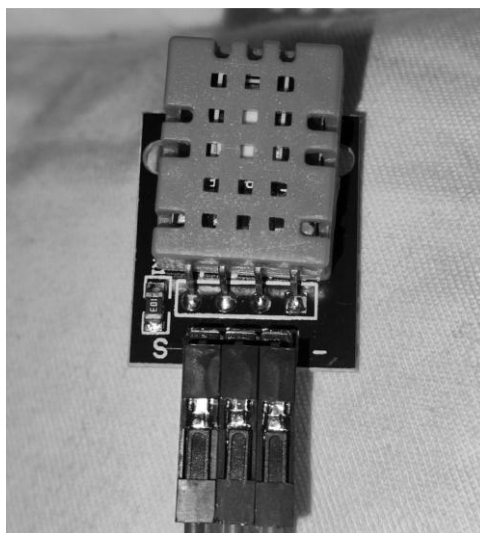


Рисунок 3.15 — Підключення до датчика KY-015 (DHT11)

KY-015 (DHT11):

Пін S підключений до цифрового входу D9, що дозволяє легко зчитувати дані з датчика за допомогою бібліотеки DHT. Вибір D9 є довільним і може бути змінений на інший цифровий вхід.

Підключення BMP280 (Рисунок 3.16)

VCC — 3V3: Подача живлення на датчик (3.3V).

GND — GND: Підключення до землі.

SCL — A5: Пін SCL (Serial Clock Line) використовується для синхронізації передачі даних на I2C шині.

SDA — A4: Пін SDA (Serial Data Line) використовується для передачі даних на I2C шині.



Рисунок 3.16 — Підключення до датчика BMP280

BMP280:

Використовує піни SCL та SDA для зв'язку по I2C (Inter-Integrated Circuit), що є стандартним протоколом для підключення датчиків та інших периферійних пристроїв до мікроконтролера. Піни A4 та A5 є стандартними для I2C на платі Arduino Nano.

2) Підключення системи (приймач) (Рисунок 3.12)

Підключення ESP8266 з LoRa:

Підключення до ESP8266 виконано за допомоги кабелів для макетних плат (мама-мама) (Рисунок 3.17)

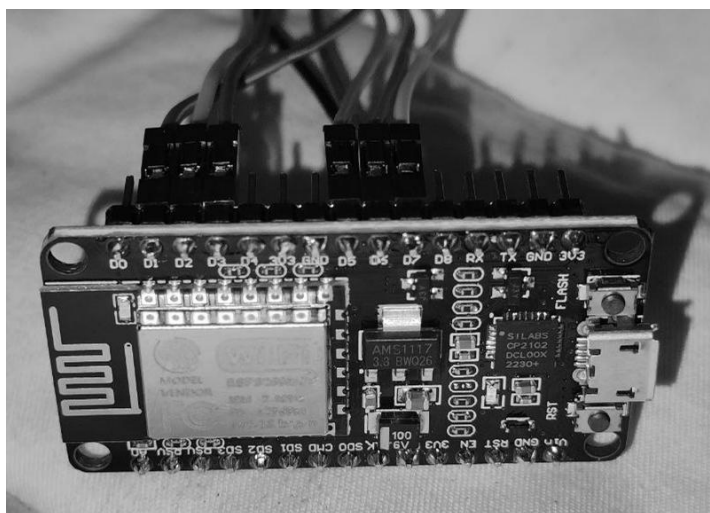


Рисунок 3.17 — Підключення до плати ESP8266

Підключення LoRa модуль RFM95W

GND — GND: Підключення до землі.

3.3V — 3V3: Подача живлення на модуль (3.3V).

MISO — D6: Піл MISO (Master In Slave Out) використовується для передачі даних від модуля RFM95W до ESP8266.

MOSI — D7: Піл MOSI (Master Out Slave In) використовується для передачі даних від ESP8266 до модуля RFM95W.

SCK — D5: Піл SCK (Serial Clock) використовується для синхронізації передачі даних між ESP8266 та RFM95W.

NSS — D2: Пін NSS (Slave Select) використовується для вибору модуля RFM95W як активного пристрою на SPI шині.

RESET — D3: Пін RESET використовується для скидання модуля.

DIO0 — D1: Пін DIO0 використовується для сигналізації подій, таких як завершення передачі або прийому даних.

LoRa модуль RFM95W:

Використання пінів MISO, MOSI та SCK для SPI зв'язку є стандартним та забезпечує високу швидкість передачі даних.

Пін NSS вибрано для вибору активного пристрою на SPI шині.

Піни DIO0 та RESET використовуються для сигналізації подій та скидання модуля відповідно, що є необхідним для його правильного функціонування.

Вибір пінів для підключення компонентів є важливим аспектом, оскільки забезпечує правильну роботу всіх елементів системи та стабільну передачу даних.

3.3 Програмування компонентів

Програмування системи виконано в середовищі Arduino IDE.

Arduino Integrated Development Environment (IDE) — це платформа, що забезпечує зручний інтерфейс для написання, компіляції та завантаження коду на мікроконтролери Arduino. Вона підтримує різноманітні платформи, включаючи Windows, macOS та Linux.

Для роботи з обраними компонентами нам необхідно встановити відповідні бібліотеки. Це можна зробити через Library Manager, який є частиною Arduino IDE.

1) Бібліотека «Adafruit BMP280 Library» призначена для роботи з датчиком тиску та температури BMP280, який використовує інтерфейс I2C або SPI для зв'язку. BMP280 є високоточним датчиком, який дозволяє зчитувати атмосферний тиск, температуру та висоту.

Функціональні можливості:

— зчитування атмосферного тиску в Паскалях (Па);

- зчитування температури в градусах Цельсія (°C);
- обчислення висоти на основі атмосферного тиску.

2) Бібліотека «DHT sensor library» призначена для роботи з різними датчиками DHT, такими як DHT11, DHT22 і AM2302. Ці датчики використовуються для вимірювання температури та відносної вологості.

Функціональні можливості:

- зчитування температури в градусах Цельсія або Фаренгейта;
- зчитування відносної вологості у відсотках;
- підтримка декількох типів датчиків DHT.

3) Бібліотека RadioHead є потужною та гнучкою бібліотекою для бездротового зв'язку між пристроями. Вона підтримує широкий спектр радіомодулів, включаючи LoRa модулі, такі як RFM95W. Бібліотека забезпечує надійну передачу даних та різні методи модуляції.

Функціональні можливості:

- підтримка різних протоколів та модулів (LoRa, FSK, GFSK тощо);
- надійна передача даних з використанням підтверджень та повторів;
- простий інтерфейс для відправки та прийому повідомлень.

4) Бібліотека ESP8266WiFi забезпечує простий та зручний інтерфейс для роботи з Wi-Fi модулем ESP8266. Ця бібліотека є невід'ємною частиною програмування ESP8266, оскільки дозволяє підключатися до Wi-Fi мереж, відправляти HTTP-запити, отримувати дані з вебсерверів та виконувати інші мережеві операції.

Функціональні можливості:

- підключення до Wi-Fi: бібліотека надає функції для підключення до Wi-Fi мережі з використанням SSID та пароля;
- DHCP і статичні IP-адреси: можливість використання динамічних або статичних IP-адрес;
- Wi-Fi моди: підтримка різних режимів роботи, таких як станція (STA), точка доступу (AP) та комбінований режим (AP+STA);

- сканування Wi-Fi мереж: можливість сканування доступних Wi-Fi мереж та отримання інформації про них;
- HTTP-запити: бібліотека забезпечує прості методи для створення HTTP-запитів (GET, POST) та обробки відповідей;
- TCP і UDP: підтримка TCP і UDP протоколів для передачі даних;
- безпека: підтримка різних методів шифрування та безпеки Wi-Fi мереж.

5) Бібліотека `ESP8266HTTPClient` є частиною екосистеми ESP8266, яка забезпечує можливість відправки HTTP-запитів з модуля ESP8266. Вона дозволяє створювати HTTP-запити (GET, POST, PUT, DELETE та інші) до вебсерверів і обробляти відповіді, що робить її ідеальним інструментом для інтеграції IoT пристроїв з вебсервісами.

Функціональні можливості:

- підтримка всіх основних HTTP методів, таких як GET, POST, PUT, DELETE;
- можливість додавання користувацьких заголовків до HTTP-запитів;
- підтримка передачі даних у тілі запиту для методів POST і PUT;
- зчитування коду статусу, заголовків та тіла відповіді від вебсерверу;
- можливість створення безпечних запитів через HTTPS з використанням SSL/TLS.

Робота систем:

- Arduino Nano приймає дані з усіх датчиків, рахує середню температуру двох датчиків, створює повідомлення з даними для передачі через LoRa і відправляє їх на модуль RFM95W. Модуль відправляє дані на відстань до 10 км. Інший модуль RFM95W приймає дані та передає на плату ESP8266, яка обробляє дані та передає їх через Wi-Fi на обране API.

Написаний код до системи передатчика для Arduino Nano можна подивитись у додатку Д. Код до системи приймача написаний для ESP8266 можна переглянути у додатку Е.

4 ЕКОНОМІЧНА ЧАСТИНА

4.1 Оцінювання комерційного потенціалу розробки

Метою проведення комерційного та технологічного аудиту є оптимізація процесу відслідковування погодних умов за допомогою комп'ютерної системи на базі технології LoRaWAN, забезпечуючи точність та ефективність збору та аналізу даних щодо погоди. Це досягається за рахунок розробки та впровадження нового обладнання та програмного забезпечення.

Для проведення технологічного аудиту було залучено 3-х незалежних експертів з Вінницького національного технічного університету:

- Савицька Людмила Анатоліївна, доцент кафедри обчислювальної техніки;
- Крупельницький Леонід Віталійович, доцент кафедри обчислювальної техніки;
- Рейда Олександр Миколайович, доцент кафедри програмного забезпечення.

Для проведення технологічного аудиту було використано таблицю 4.1 [1] в якій за п'ятибальною шкалою використовуючи 12 критеріїв здійснено оцінку комерційного потенціалу.

Таблиця 4.1 — Рекомендовані критерії оцінювання комерційного потенціалу розробки та їх можлива бальна оцінка

Критерії оцінювання та бали (за 5-ти бальною шкалою)					
Критерій	0	1	2	3	4
Технічна здійсненність концепції:					
	Достовірність концепції не підтверджена	Концепція підтверджена експертними висновками	Концепція підтверджена розрахунками	Концепція перевірена на практиці	Перевірено роботоздатність продукту в реальних умовах
Ринкові переваги (недоліки):					
	Багато аналогів на малому ринку	Мало аналогів на малому ринку	Кілька аналогів на великому ринку	Один аналог на великому ринку	Продукт не має аналогів на великому ринку

Критерії оцінювання та бали (за 5-ти бальною шкалою)					
Критерій	0	1	2	3	4
	Ціна продукту значно вища за ціни аналогів	Ціна продукту дещо вища за ціни аналогів	Ціна продукту приблизно дорівнює цінам аналогів	Ціна продукту дещо нижче за ціни аналогів	Ціна продукту значно нижче за ціни аналогів
	Технічні та споживчі властивості продукту значно гірші, ніж в аналогів	Технічні та споживчі властивості продукту трохи гірші, ніж в аналогів	Технічні та споживчі властивості продукту на рівні аналогів	Технічні та споживчі властивості продукту трохи кращі, ніж в аналогів	Технічні та споживчі властивості продукту значно кращі, ніж в аналогів
	Експлуатаційні витрати значно вищі, ніж в аналогів	Експлуатаційні витрати дещо вищі, ніж в аналогів	Експлуатаційні витрати на рівні експлуатаційних витрат аналогів	Експлуатаційні витрати трохи нижчі, ніж в аналогів	Експлуатаційні витрати значно нижчі, ніж в аналогів
Ринкові перспективи					
	Ринок малий і не має позитивної динаміки	Ринок малий, але має позитивну динаміку	Середній ринок з позитивною динамікою	Великий стабільний ринок	Великий ринок з позитивною динамікою
	Активна конкуренція великих компаній на ринку	Активна конкуренція	Помірна конкуренція	Незначна конкуренція	Конкурентів немає
Практична здійсненність					
	Відсутні фахівці як з технічної, так і з комерційної реалізації ідеї	Необхідно наймати фахівців або витрачати значні кошти та час на навчання наявних фахівців	Необхідне незначне навчання фахівців та збільшення їх штату	Необхідне незначне навчання фахівців	Є фахівці з питань як з технічної, так і з комерційної реалізації ідеї
	Потрібні значні фінансові ресурси, які відсутні. Джерела фінансування ідеї відсутні	Потрібні незначні фінансові ресурси. Джерела фінансування відсутні	Потрібні значні фінансові ресурси. Джерела фінансування є	Потрібні незначні фінансові ресурси. Джерела фінансування є	Не потребує додаткового фінансування
0	Необхідна розробка нових матеріалів	Потрібні матеріали, що використовуються у військово-промисловому комплексі	Потрібні дорогі матеріали	Потрібні досяжні та дешеві матеріали	Всі матеріали для реалізації ідеї відомі та давно використовуються у виробництві
1	Термін реалізації ідеї більший за 10 років	Термін реалізації ідеї більший за 5 років. Термін окупності інвестицій більше 10-ти років	Термін реалізації ідеї від 3-х до 5-ти років. Термін окупності інвестицій більше 5-ти років	Термін реалізації ідеї менше 3-х років. Термін окупності інвестицій від 3-х до 5-ти років	Термін реалізації ідеї менше 3-х років. Термін окупності інвестицій менше 3-х років

Критерії оцінювання та бали (за 5-ти бальною шкалою)					
Критерій	0	1	2	3	4
2	Необхідна розробка регламентних документів та отримання великої кількості дозвільних документів на виробництво та реалізацію продукту	Необхідно отримання великої кількості дозвільних документів на виробництво та реалізацію продукту, що вимагає значних коштів та часу	Процедура отримання дозвільних документів для виробництва та реалізації продукту вимагає незначних коштів та часу	Необхідно тільки повідомлення відповідним органам про виробництво та реалізацію продукту	Відсутні будь-які регламентні обмеження на виробництво та реалізацію продукту

Таблиця 4.2 — Рівні комерційного потенціалу розробки

Середньоарифметична сума балів СБ, розрахована на основі висновків експертів	Рівень комерційного потенціалу розробки
0-10	Низький
11-20	Нижче середнього
21-30	Середній
31-40	Вище середнього
41-48	Високий

В таблиці 4.3 наведено результати оцінювання експертами комерційного потенціалу розробки.

Таблиця 4.3 — Результати оцінювання комерційного потенціалу розробки

Критерії	Прізвище, ініціали, посада експерта		
	Савицька Л.А.	Крупельницький Л. В.	Рейда О. М.
	Бали, виставлені експертами:		
1	3	2	2
2	1	1	1
3	3	3	3
4	2	1	1
5	2	2	2
6	1	1	1
7	3	3	3
8	2	2	2

Критерії	Прізвище, ініціали, посада експерта		
	Савицька Л.А.	Крупельницький Л. В.	Рейда О. М.
	Бали, виставлені експертами:		
9	2	2	2
10	4	3	4
11	3	2	2
12	3	3	3
Сума балів	СБ ₁ =29	СБ ₂ =25	СБ ₃ =26
Середньоарифметична сума балів $\overline{СБ}$	$\overline{СБ} = \frac{29 + 25 + 26}{3} = 26.66$		

Середньоарифметична оцінка, отримана на основі експертних висновків, становить 27 бали, і згідно з таблицею 4.2, це вказує на середній рівень комерційного потенціалу результатів проведених досліджень.

Розроблена комп'ютерна система моніторингу погодних умов може бути реалізована в кількох практичних напрямках залежно від потреб користувачів і масштабу застосування.

На початковому етапі система може бути впроваджена у вигляді демонстраційного прототипу на базі університету або дослідницької лабораторії. Такий прототип може бути встановлений на території навчального корпусу ВНТУ, де вже існує можливість підключення шлюзу LoRaWAN і серверної частини (наприклад, через платформу The Things Network або приватний сервер).

Також система може бути використана для моніторингу мікроклімату на сільськогосподарських угіддях, фермах чи теплицях, у міських системах моніторингу та у навчальному процесі.

Проведемо оцінку якості і конкурентоспроможності нової розробки порівняно з аналогом.

В якості аналога для розробки було обрано метеостанцію Dragino LoRaWAN Weather Station, яка є одним із найпоширеніших промислових рішень для моніторингу погодних умов на базі технології LoRaWAN. Цей пристрій має модульну структуру, підтримує бездротову передачу даних на відстань до 15 км та може інтегруватися з хмарними сервісами для збереження і аналізу даних.

Основними недоліками аналога є:

- висока вартість обладнання, що ускладнює його масове впровадження у навчальних або фермерських проєктах малого масштабу;
- обмежені можливості кастомізації — закрите апаратне і програмне забезпечення не дозволяє користувачу гнучко змінювати склад датчиків або алгоритми обробки даних;
- відсутність локальної обробки даних — усі вимірювання надсилаються на зовнішній сервер, що потребує постійного мережевого з'єднання;
- енергозалежність — автономна робота обмежена стандартними батареями, без оптимізації споживання енергії або можливості використання сонячного живлення в базовій конфігурації.

Також до недоліків можна віднести:

- складність у розгортанні мережевої інфраструктури без фахової підготовки;
- відсутність відкритого програмного API для інтеграції з власними аналітичними або навчальними системами;
- закритий вихідний код, що обмежує можливості модернізації чи адаптації під специфічні вимоги користувача.

У розробці дана проблема вирішується завдяки:

- використанню відкритих апаратних платформ (Arduino, ESP32) та бібліотек з відкритим кодом, що дозволяє гнучко модифікувати структуру пристрою;
- можливості локальної обробки даних на мікроконтролері із застосуванням алгоритмів фільтрації (наприклад, фільтра Калмана) перед передачею інформації через LoRaWAN;
- впровадженню енергоефективного живлення з використанням сонячної панелі та акумулятора;
- інтеграції з The Things Network (TTN) для безкоштовної передачі даних у відкриту мережу LoRaWAN;

— розробці власного веб-інтерфейсу для перегляду, аналізу та візуалізації зібраних метеорологічних параметрів.

Порівняння аналога з новою розробкою наведено в таблиці 4.4

Таблиця 4.4 — Порівняння аналога з новою розробкою

Показник	Варіанти	
	Базовий (товар-конкурент)	Новий (інноваційне рішення)
1	2	3
Дальність передачі даних	до 10—15 км	до 15 км (оптимізована антена, краща чутливість приймача)
Енергоспоживання	середнє, живлення від батарей	низьке, живлення від сонячної панелі + акумулятор
Гнучкість конфігурації	обмежена, закрите ПЗ та апаратна частина	висока, відкритий код і змінна конфігурація сенсорів
Можливість локальної обробки даних	відсутня (обробка лише в хмарі)	реалізована (алгоритми фільтрації, Kalman, інтерполяція)
Масштабованість системи	обмежена кількість вузлів	розширювана до мережі з кількох станцій
Доступність даних / інтеграція	через власну платформу Dragino	відкриті API, сумісність з TTN, Grafana, InfluxDB
Вартість системи	висока (≈ 400 — 500 USD)	низька (≈ 100 — 120 USD)

Як видно за таблиці 4.4 нова розробка є набагато краще за технічними показниками та є дешевшою майже в 4 рази.

4.2 Прогнозування витрат на виконання науково-дослідної роботи

Витрати, пов'язані з проведенням науково-дослідної роботи групуються за такими статтями: витрати на оплату праці, витрати на соціальні заходи,

матеріали, паливо та енергія для науково-виробничих цілей, витрати на службові відрядження, програмне забезпечення для наукових робіт, інші витрати, накладні витрати.

1. Основна заробітна плата кожного із дослідників $З_0$, якщо вони працюють в наукових установах бюджетної сфери визначається за формулою:

$$З_0 = \frac{M}{T_p} * t \text{ (грн)} \quad (4.1)$$

де M — місячний посадовий оклад конкретного розробника (інженера, дослідника, науковця тощо), грн.;

T_p — число робочих днів в місяці; приблизно $T_p \approx 21...23$ дні;

t — число робочих днів роботи дослідника.

Зведемо сумарні розрахунки до таблиця 4.5.

Таблиця 4.5 — Заробітна плата дослідника в науковій установі бюджетної сфери

Найменування посади	Місячний посадовий оклад, грн.	Оплата за робочий день, грн.	Число днів роботи	Витрати на заробітну плату, грн.
Керівник	17000	809,5	5	4048
Інженер	11000	523,8	21	11000
Програміст	18000	857,1	22	18857
Тестувальник	13000	619,0	5	3095
Всього				18143

2. Витрати на основну заробітну плату робітників ($З_p$) за відповідними найменуваннями робіт розраховують за формулою:

3.

$$З_p = \sum_{i=1}^n C_i \cdot t_i, \quad (4.2)$$

де C_i — погодинна тарифна ставка робітника відповідного розряду, за виконану відповідну роботу, грн/год;

t_i — час роботи робітника на виконання певної роботи, год.

Погодинну тарифну ставку робітника відповідного розряду C_i можна визначити за формулою:

$$C_i = \frac{M_m \cdot K_i \cdot K_c}{T_p \cdot t_{зм}}, \quad (4.3)$$

де M_m — розмір прожиткового мінімуму працездатної особи або мінімальної місячної заробітної плати (залежно від діючого законодавства), грн;

K_i — коефіцієнт міжкваліфікаційного співвідношення для встановлення тарифної ставки робітнику відповідного розряду;

K_c — мінімальний коефіцієнт співвідношень місячних тарифних ставок робітників першого розряду з нормальними умовами праці виробничих об'єднань і підприємств до законодавчо встановленого розміру мінімальної заробітної плати.

T_p — середня кількість робочих днів в місяці, приблизно $T_p = 21 \dots 23$ дні;

$t_{зм}$ — тривалість зміни, год.

Таблиця 4.6 — Величина витрат на основну заробітну плату робітників

Найменування робіт	Тривалість роботи, год	Розряд роботи	Погодинна тарифна ставка, грн	Величина оплати на робітника, грн
1.Підготовчі	2	1	47,6	95,2
2.Монтажні	3	3	64,3	192,9
3.Складальні	2	5	81,0	161,9
4.Налагоджувальні	6	2	52,4	314,3
5.Випробувальні	3	4	71,4	214,3

Всього				978,6
--------	--	--	--	-------

4. Розрахунок додаткової заробітної плати робітників

Додаткова заробітна плата $З_d$ всіх розробників та робітників, які приймали участь в розробці нового технічного рішення розраховується як 10 - 12 % від основної заробітної плати робітників.

На даному підприємстві додаткова заробітна плата начисляється в розмірі 11% від основної заробітної плати.

$$З_d = (З_o + З_p) * \frac{Н_{дод}}{100\%} \quad (4.4)$$

$$З_d = 0,11 * (18143 + 978,6) = 2103,36 \text{ (грн)}$$

4. Нарахування на заробітну плату $Н_{зп}$ дослідників та робітників, які брали участь у виконанні даного етапу роботи, розраховуються за формулою (4.5):

$$Н_{зп} = (З_o + З_p + З_d) * \frac{\beta}{100} \text{ (грн)} \quad (4.5)$$

де $З_o$ — основна заробітна плата розробників, грн.;

$З_d$ — додаткова заробітна плата всіх розробників та робітників, грн.;

$З_p$ — основну заробітну плату робітників, грн.;

β — ставка єдиного внеску на загальнообов'язкове державне соціальне страхування, % .

Дана діяльність відноситься до бюджетної сфери, тому ставка єдиного внеску на загальнообов'язкове державне соціальне страхування буде складати 22%, тоді:

$$Н_{зп} = (18143 + 978,6 + 2103,36) * \frac{22}{100} = 4669,45 \text{ (грн)}$$

5. Сировина та матеріали.

До статті «Сировина та матеріали» належать витрати на сировину, основні та допоміжні матеріали, інструменти, пристрої та інші засоби й предмети праці, які придбані у сторонніх підприємств, установ і організацій та витрачені на проведення досліджень за прямим призначенням згідно з нормами їх витрачання, а також витрачені придбані напівфабрикати, що підлягають монтажу або виготовленню й додатковій обробці в цій організації, чи дослідні зразки, що виготовляються виробниками за документацією наукової організації.

Витрати на матеріали (М) у вартісному вираженні розраховуються окремо для кожного виду матеріалів за формулою:

$$M = \sum_{j=1}^n H_j \cdot C_j \cdot K_j - \sum_{j=1}^n B_j \cdot C_{Bj}, \quad (4.6)$$

де H_j — норма витрат матеріалу j -го найменування, кг;

n — кількість видів матеріалів;

C_j — вартість матеріалу j -го найменування, грн/кг;

K_j — коефіцієнт транспортних витрат, ($K_j = 1,1 \dots 1,15$);

B_j — маса відходів j -го найменування, кг;

C_{Bj} — вартість відходів j -го найменування, грн/кг.

Проведені розрахунки зведені в таблицю 4.7.

Таблиця 4.7 — Витрати на матеріали

Найменування матеріалу, марка, тип, сорт	Ціна за 1 кг, грн	Норма витрат, шт	Вартість витраченого матеріалу, грн
FR4 (плата РСВ, епоксидне склоткане полотно)	300	0,05	15
Паяльний припій (безсвинцевий Sn96.5Ag3.0Cu0.5)	1200	0,05	60

Найменування матеріалу, марка, тип, сорт	Ціна за 1 кг, грн	Норма витрат, шт	Вартість витраченого матеріалу, грн
Пластик ABS (корпус)	100	0,25	25
Алюмінієвий профіль (щогла / кронштейн)	240	2,50	600
Нержавіючі кріплення (гвинти, шайби)	220	0,2	44
Мідний провід (електропровідка)	500	0,5	250
Силіконовий герметик (для ущільнення)	350	0,2	70
Клей-епоксид (партія)	420	0,1	42
Упаковка / пінопласт / пакувальний матеріал	80	0,2	16
Фарбування / лак (захисне покриття)	180	0,05	9
З врахуванням коефіцієнта транспортування			1244,1

6. Розрахунок витрат на комплектуючі

Витрати на комплектуючі вироби (K_e), які використовують при дослідженні нового технічного рішення, розраховуються, згідно з їхньою номенклатурою, за формулою:

$$K_e = \sum_{j=1}^n H_j \cdot C_j \cdot K_j \quad (4.7)$$

де H_j — кількість комплектуючих j -го виду, шт.;

C_j — покупна ціна комплектуючих j -го виду, грн;

K_j — коефіцієнт транспортних витрат, ($K_j = 1,1 \dots 1,15$).

Проведені розрахунки бажано звести до таблиці 4.8.

Таблиця 4.8 — Витрати на комплектуючі

Найменування комплектуючих	Кількість, шт.	Ціна за штуку, грн	Сума, грн
Arduino Nano	1	105	105
KY-015 (DHT11)	1	300	300
BMP280	1	46	46
RFM95W	2	450	900
ESP8266	1	260	260
Всього з врахуванням транспортних витрат			1772,10

7. Програмне забезпечення для наукових (експериментальних) робіт в магістерській роботі використовувались безкоштовні ресурси такі як: Arduino IDE, NS-3, Visual Studio.

8. Амортизація обладнання, програмних засобів та приміщень

В спрощеному вигляді амортизаційні відрахування по кожному виду обладнання, приміщень та програмному забезпеченню тощо, можуть бути розраховані з використанням прямолінійного методу амортизації за формулою:

$$A_{обл} = \frac{Ц_{б}}{T_{г}} \cdot \frac{t_{вик}}{12}, \quad (4.8)$$

де $Ц_{б}$ — балансова вартість обладнання, програмних засобів, приміщень тощо, які використовувались для проведення досліджень, грн;

$t_{вик}$ — термін використання обладнання, програмних засобів, приміщень під час досліджень, місяців;

$T_{г}$ — строк корисного використання обладнання, програмних засобів, приміщень тощо, років.

Проведені розрахунки необхідно звести до таблиці 4.9.

Таблиця 4.9 — Амортизаційні відрахування по кожному виду обладнання

Найменування обладнання	Балансова вартість, грн	Строк корисного використання, років	Термін використання обладнання, місяців	Амортизаційні відрахування, грн
1. Ноутбук ASUS VivoBook	28000	2	1	1166,67
2. Осцилограф цифровий Rigol DS1054Z	14000	4	1	291,67
3. Мультиметр UNI-T UT61E	3200	2	1	133,33
4. Лабораторний блок живлення Riden RD6018	4500	4	1	93,75
5. 3D-принтер Creality Ender-3	9000	2	1	375,00
6. LoRaWAN-шлюз	3800	2	1	158,33
Всього				2218,75

9. До статті «Паливо та енергія для науково-виробничих цілей» відносяться витрати на всі види палива й енергії, що безпосередньо використовуються з технологічною метою на проведення досліджень.

$$B_e = \sum_{i=1}^n \frac{W_{yt} \cdot t_i \cdot C_e \cdot K_{впi}}{\eta_i} \quad (4.9)$$

де W_{yt} — встановлена потужність обладнання на певному етапі розробки, кВт;

t_i — тривалість роботи обладнання на етапі дослідження, год;

C_e — вартість 1 кВт-години електроенергії, грн;

$K_{впi}$ — коефіцієнт, що враховує використання потужності, $K_{впi} < 1$;

η_i — коефіцієнт корисної дії обладнання, $\eta_i < 1$.

Для написання магістерської роботи використовується персональний комп'ютер для якого розрахуємо витрати на електроенергію.

$$B_e = \frac{0,5 \cdot 210 \cdot 12,69 \cdot 0,5}{0,8} = 832,78$$

10. Службові відрядження.

Витрати за статтею «Службові відрядження» розраховуються як 20...25% від суми основної заробітної плати дослідників та робітників за формулою:

$$B_{cb} = (3_o + 3_p) * \frac{H_{cb}}{100\%}, \quad (4.10)$$

де H_{cb} — норма нарахування за статтею «Службові відрядження».

$$B_{cb} = 0,2 * (18143 + 978,6) = 3824,29$$

11. Накладні (загальновиробничі) витрати $B_{нзв}$ охоплюють: витрати на управління організацією, оплата службових відряджень, витрати на утримання, ремонт та експлуатацію основних засобів, витрати на опалення, освітлення, водопостачання, охорону праці тощо. Накладні (загальновиробничі) витрати $B_{нзв}$ можна прийняти як (100...150)% від суми основної заробітної плати розробників та робітників, які виконували дану МКНР, тобто:

$$B_{нзв} = (3_o + 3_p) \cdot \frac{H_{нзв}}{100\%}, \quad (4.11)$$

де $H_{нзв}$ — норма нарахування за статтею «Інші витрати».

$$B_{нзв} = (18143 + 978,6) \cdot \frac{100}{100\%} = 19121,41 \text{ грн}$$

Сума всіх попередніх статей витрат дає витрати, які безпосередньо стосуються даного розділу МКНР

$$B = 18143 + 978,6 + 2103,36 + 4669,45 + 1244,1 + 1772,1 + 2218,75 + 832,78 + 3824,29 + 19121,41 = 54907,68 \text{ грн}$$

Прогнозування загальних втрат ЗВ на виконання та впровадження результатів виконаної МКНР здійснюється за формулою:

$$ЗВ = \frac{В}{\eta}, \quad (4.12)$$

де η — коефіцієнт, який характеризує стадію виконання даної НДР.

Оскільки, робота знаходиться на стадії науково-дослідних робіт, то коефіцієнт $\beta = 0,5$.

Звідси:

$$ЗВ = \frac{54907,68}{0,5} = 109815,37 \text{ грн.}$$

4.3 Розрахунок економічної ефективності науково-технічної розробки

У даному підрозділі кількісно спрогнозуємо, яку вигоду, зиск можна отримати у майбутньому від впровадження результатів виконаної наукової роботи. Розрахуємо збільшення чистого прибутку підприємства $\Delta\Pi_i$, для кожного із років, протягом яких очікується отримання позитивних результатів від впровадження розробки, за формулою

$$\Delta\Pi_i = \sum_1^n (\Delta\Pi_o \cdot N + \Pi_o \cdot \Delta N)_i \cdot \lambda \cdot \rho \cdot \left(1 - \frac{\nu}{100}\right) \quad (4.13)$$

де $\Delta\Pi_o$ — покращення основного оціночного показника від впровадження результатів розробки у даному році.

N — основний кількісний показник, який визначає діяльність підприємства у даному році до впровадження результатів наукової розробки;

ΔN — покращення основного кількісного показника діяльності підприємства від впровадження результатів розробки:

Π_o — основний оціночний показник, який визначає діяльність підприємства у даному році після впровадження результатів наукової розробки;

n — кількість років, протягом яких очікується отримання позитивних результатів від впровадження розробки:

l — коефіцієнт, який враховує сплату податку на додану вартість. Ставка податку на додану вартість дорівнює 20%, а коефіцієнт $l = 0,8333$.

p — коефіцієнт, який враховує рентабельність продукту. $p = 0,25$;

x — ставка податку на прибуток. У 2025 році — 18%.

Припустимо, що ціна зростає на 800 грн. Кількість одиниць реалізованої продукції також збільшиться: протягом першого року на 120 шт., протягом другого року — на 150 шт., протягом третього року на 200 шт. Реалізація продукції до впровадження розробки складала 1 шт., а її ціна до 5000 грн. Розрахуємо прибуток, яке отримає підприємство протягом трьох років.

$$\begin{aligned}\Delta\P_1 &= [800 \cdot 1 + (5000 + 800) \cdot 120] \cdot 0,833 \cdot 0,25 \cdot \left(1 + \frac{18}{100}\right) \\ &= 119031,91 \text{ грн.}\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\Delta\P_2 &= [800 \cdot 1 + (5000 + 800) \cdot (120 + 150)] \cdot 0,833 \cdot 0,25 \cdot \left(1 + \frac{18}{100}\right) \\ &= 268314,3 \text{ грн.}\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\Delta\P_3 &= [800 \cdot 1 + (5000 + 800) \cdot (120 + 150 + 200)] \cdot 0,833 \cdot 0,25 \cdot \left(1 + \frac{18}{100}\right) \\ &= 466273,04 \text{ грн.}\end{aligned}$$

4.4 Розрахунок ефективності вкладених інвестицій та періоду їх окупності

Розрахуємо основні показники, які визначають доцільність фінансування наукової розробки певним інвестором, є абсолютна і відносна ефективність вкладених інвестицій та термін їх окупності.

Розрахуємо величину початкових інвестицій PV , які потенційний інвестор має вкласти для впровадження і комерціалізації науково-технічної розробки.

$$PV = k_{\text{інв}} \cdot 3B, \quad (4.14)$$

$k_{\text{інв}}$ — коефіцієнт, що враховує витрати інвестора на впровадження науково-технічної розробки та її комерціалізацію. Це можуть бути витрати на підготовку приміщень, розробку технологій, навчання персоналу, маркетингові заходи тощо ($k_{\text{інв}} = 2 \dots 5$).

$$PV = 2 \cdot 109815,37 = 219630,73$$

Розрахуємо абсолютну ефективність вкладених інвестицій $E_{\text{абс}}$ згідно наступної формули:

$$E_{\text{абс}} = (ПП - PV) \quad (4.15)$$

де ПП — приведена вартість всіх чистих прибутків, що їх отримає підприємство від реалізації результатів наукової розробки, грн.;

$$ПП = \sum_1^T \frac{\Delta \Pi_i}{(1 + \tau)^t}, \quad (4.16)$$

де $\Delta \Pi_i$ — збільшення чистого прибутку у кожному із років, протягом яких виявляються результати виконаної та впровадженої НДЦКР, грн.;

T — період часу, протягом якою виявляються результати впровадженої НДЦКР, роки;

τ — ставка дисконтування, за яку можна взяти щорічний прогнозований рівень інфляції в країні; для України цей показник знаходиться на рівні 0,2;

t — період часу (в роках).

$$ПП = \frac{119031,91}{(1 + 0,2)^1} + \frac{268314,3}{(1 + 0,2)^2} + \frac{466473,04}{(1 + 0,2)^3} = 556727,88 \text{ грн.}$$

$$E_{abc} = (556727,88 - 219630,73) = 337097,15 \text{ грн.}$$

Оскільки $E_{abc} > 0$ то вкладання коштів на виконання та впровадження результатів НДДКР може бути доцільним.

Розрахуємо відносну (щорічну) ефективність вкладених в наукову розробку інвестицій E_e . Для цього користуються формулою:

$$E_e = \sqrt[T_{жс}]{1 + \frac{E_{abc}}{PV}} - 1, \quad (4.17)$$

$T_{жс}$ – життєвий цикл наукової розробки, роки.

$$E_e = \sqrt[3]{1 + \frac{337097,15}{219630,73}} - 1 = 0,6 = 60\%$$

Визначимо мінімальну ставку дисконтування, яка у загальному вигляді визначається за формулою:

$$\tau = d + f, \quad (4.18)$$

де d — середньозважена ставка за депозитними операціями в комерційних банках; в 2025 році в Україні $d = (0,14 \dots 0,2)$;

f — показник, що характеризує ризикованість вкладень; зазвичай, величина $f = (0,05 \dots 0,1)$.

$$\tau_{\min} = 0,18 + 0,05 = 0,23$$

Так як $E_g > \tau_{\min}$ то інвестор може бути зацікавлений у фінансуванні даної наукової розробки.

Розрахуємо термін окупності вкладених у реалізацію наукового проекту інвестицій за формулою:

$$T_{ок} = \frac{1}{E_g} \quad (4.19)$$

$$T_{ок} = \frac{1}{0,6} = 1,7 \text{ роки}$$

Так як $T_{ок} \leq 3...5$ -ти років, то фінансування даної наукової розробки в принципі є доцільним.

ВИСНОВКИ

У магістерській кваліфікаційній роботі вирішено актуальну науково-практичну задачу розробки та дослідження комп'ютерної системи моніторингу погодних умов з використанням безпроводних інтерфейсів, орієнтованої на автономну роботу, низьке енергоспоживання та надійну передачу метеорологічних даних на великі відстані.

У ході виконання роботи проведено аналіз предметної області та огляд сучасних IoT-рішень у сфері метеорологічного моніторингу. Обґрунтовано доцільність використання технології LoRaWAN як базової платформи для побудови бездротових метеорологічних систем, здатних ефективно функціонувати у віддалених та важкодоступних умовах за мінімальних енергетичних витрат.

На основі аналізу було обґрунтовано вибір апаратних і програмних засобів комп'ютерної системи, розроблено її структурну та функціональну архітектуру, що забезпечує узгоджену взаємодію сенсорних вузлів, мережі LoRaWAN та серверної частини.

У роботі досліджено та реалізовано сучасні методи обробки часових рядів метеорологічних даних. Використання фільтра Калмана забезпечило зменшення впливу шумів і похибок сенсорів у режимі реального часу, застосування STL-декомпозиції дозволило виділити трендові та сезонні компоненти даних, а модель ARIMA — здійснювати короткострокове прогнозування погодних параметрів з достатньою точністю. Поєднання цих методів підвищує точність, надійність та інформативність результатів моніторингу за умов обмежених ресурсів сенсорних вузлів.

Розроблено алгоритми функціонування сенсорних вузлів і серверної частини системи, які охоплюють процеси збору, попередньої обробки, передачі та аналізу метеорологічних даних. Запропоновані алгоритмічні рішення забезпечують оптимальний баланс між точністю вимірювань, енергоспоживанням і стабільністю роботи системи.

Результати здійсненого технологічного аудиту вказують на середній рівень комерційного потенціалу. У порівнянні з аналогічним виробом виявлено, що нова розробка є кращою за технічними і економічними показниками.

Вкладені інвестиції в даний проект окупляться через 1,7 роки. Загальні витрати складають 109815,37 грн., прогнозований прибуток за три роки складе 556727,88 грн.

Отримані результати підтверджують досягнення поставленої мети та виконання всіх задач магістерської роботи. Розроблена комп'ютерна система може бути використана у сільському господарстві, екологічному моніторингу, системах розумної інфраструктури, а також у навчальному процесі при підготовці фахівців у галузі комп'ютерної інженерії та IoT-технологій.

ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ

1. Савицька Л.А., Тичина Б.Р., Азаров О. Д., Клепко Д.Д. "Оптимізація енергоспоживання у сенсорних вузлах lorawan" // Вісник ВПІ, вип. 1, с. 16–20, Лютий. 2026. URL: <https://visnyk.vntu.edu.ua/index.php/visnyk/index>
2. Raj P., Raman A. C. Internet of Things: Enabling Technologies, Platforms, and Use Cases. Auerbach Publishers, Incorporated, 2019. 364 p.
3. Schwartz M. Internet of Things with ESP8266. Packt Publishing, 2019. 226 p.
4. Al Ghamdi A., Khairullah E., Al Mojamed M. LoRaWAN performance analysis for a water monitoring and leakage detection system in a housing complex. *Sensors*. 2022. Vol. 22, Is. 19. P. 1—15. DOI: 10.3390/s22197188.
5. Maksimova R., Kolev K. LoRaWAN applications — «Leonardo tasting LoRaWINE». *9th International Scientific Conference "TechSys 2020" — Engineering, Technologies and Systems*. Plovdiv, Bulgaria. May 14—16, 2020. Vol. 878. P. 1—8. DOI: 10.1088/1757-899x/878/1/012032.
6. Attack-aware synchronization-free data timestamping in lorawan / С. Гута ін. ACM transactions on sensor networks. 2022. Vol. 18, Is 1. P. 1—31. DOI: 10.1145/3474368.
7. Документація Arduino URL: <https://docs.arduino.cc/> (дата звернення: 10.05.2024).
8. Публікації URL: <https://www.atiko.com.ua/articles-ua/obzor-tekhnologii-lorawan-ua/> (дата звернення: 10.05.2024).
9. Linnemann M., Sommer A., Leufkes R. Einsatzpotentiale von LoRaWAN in der Energiewirtschaft. Wiesbaden : Springer Fachmedien Wiesbaden, 2019. DOI: 10.1007/978-3-658-26917-3.
10. Chen X., Lech M., Wang L. A complete key management scheme for lorawan v1.1. *Sensors*. 2021. Vol. 21, Is 9. P. 2962. DOI:10.3390/s21092962.
11. Вебсайт IEEE Xplore Digital Library. URL: <https://ieeexplore.ieee.org/Xplore/home.jsp>.

12. Internet of Things: A Survey on Enabling Technologies, Protocols, and Applications / A. Al-Fuqaha et al. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*. 2019. Vol. 17, Is. 4. P. 2347—2376. DOI: 10.1109/comst.2015.2444095.
13. Internet of Things (IoT): A vision, architectural elements, and future directions / J. Gubbi et al. *Future Generation Computer Systems*. 2019. Vol. 29, Is. 7. P. 1645—1660. DOI: 10.1016/j.future.2013.01.010.
14. Internet of things: Vision, applications and research challenges / D. Miorandi et al. *Ad Hoc Networks*. 2019. Vol. 10, Is. 7. P. 1497—1516. DOI: 10.1016/j.adhoc.2019.02.016.
15. Lee I., Lee K. The Internet of Things (IoT): Applications, investments, and challenges for enterprises. *Business Horizons*. 2019. Vol. 58, Is. 4. P. 431—440. DOI: 10.1016/j.bushor.2019.03.008.
16. Li M., Lin H.-J. Design and Implementation of Smart Home Control Systems Based on Wireless Sensor Networks and Power Line Communications. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*. 2019. Vol. 62, Is. 7. P. 4430—4442. DOI: 10.1109/tie.2019.2379586.
17. Madakam S., Ramaswamy R., Tripathi S. Internet of Things (IoT): A Literature Review. *Journal of Computer and Communications*. 2019. Vol. 03, Is. 05. P. 164—173. DOI: 10.4236/jcc.2015.35021.
18. Security, privacy and trust in Internet of Things: The road ahead / S. Sicari et al. *Computer Networks*. 2019. Vol. 76. P. 146—164. DOI: 10.1016/j.comnet.2014.11.008.
19. Stankovic J. A. Research Directions for the Internet of Things. *IEEE Internet of Things Journal*. 2019. Vol. 1, Is. 1. P. 3—9. DOI: 10.1109/jiot.2014.2312291.
20. The Effect of IoT New Features on Security and Privacy: New Threats, Existing Solutions, and Challenges Yet to Be Solved / W. Zhou et al. *IEEE Internet of Things Journal*. 2019. Vol. 6, Is. 2. P. 1606—1616. DOI: 10.1109/jiot.2018.2847733.

21. The Internet of Things for Ambient Assisted Living / A. Dohr et al. 2019 *7th International Conference on Information Technology: New Generations*, Las Vegas, NV, USA, 12—14 April 2019. DOI: 10.1109/itng.2010.104.
22. LoRaWAN communication protocols: a comprehensive survey under an energy efficiency perspective / K. Banti та ін. *Telecom*. 2022. Vol. 3, Is 2. P. 322—357. DOI: 10.3390/telecom3020018.
23. LoRaCog: a protocol for cognitive radio-based lora network / F. Salika та ін. *Sensors*. 2022. Vol. 22, Is 10. P. 3885. DOI: 10.3390/s22103885.
24. Методичні вказівки до виконання економічної частини магістерських кваліфікаційних робіт / Уклад. : В. О. Козловський, О. Й. Лесько, В. В. Кавецький. — Вінниця : ВНТУ, 2021. — 42 с.

ДОДАТОК А

Технічне завдання

Міністерство освіти і науки України

Вінницький національний технічний університет

Факультет інформаційних технологій та комп'ютерної інженерії

Кафедра обчислювальної техніки

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри ОТ

проф., д.т.н.. Азаров О.Д..

«__»_____2022 р.

ТЕХНІЧНЕ ЗАВДАННЯ

на виконання магістерської кваліфікаційної роботи

«Комп'ютерна система моніторингу погодних умов з використанням
безпроводних інтерфейсів»

Науковий керівник: доцент к.т.н.

_____ Савицька Л. А.

Студент групи 1КІ-24м



_____ Тичина Б. Р.

1 Підстава для виконання магістерської кваліфікаційної роботи (МКР)

1.1 Актуальність виконання магістерської кваліфікаційної роботи обумовлена розвитком технологій Інтернету речей (IoT), цифровізацією інженерних та інформаційних систем, а також зростанням потреби у точному, оперативному та безперервному моніторингу метеорологічних параметрів. Традиційні метеорологічні станції характеризуються високою вартістю, значним енергоспоживанням і складністю розгортання, що обмежує можливості їх масштабування та використання у віддалених регіонах.

Особливого значення набуває застосування бездротових мереж далекого радіусу дії з низьким енергоспоживанням (LPWAN), зокрема технології LoRaWAN, яка забезпечує ефективну передачу даних на великі відстані та дозволяє створювати автономні метеорологічні станції тривалого терміну роботи без обслуговування.

1.2 Наказ про затвердження теми магістерської кваліфікаційної роботи.

2 Мета МКР і призначення розробки

2.1 Мета магістерської кваліфікаційної роботи — аналіз сучасних IoT-рішень у сфері метеорологічного моніторингу та розробка комп'ютерної системи моніторингу погодних умов із використанням бездротових мереж, сучасних методів обробки, аналізу та прогнозування метеорологічних даних.

2.2 Призначення розробки — створення автономної комп'ютерної системи моніторингу погодних умов, яка забезпечує збір, передачу, фільтрацію, аналіз і прогнозування метеорологічних параметрів з мінімальним енергоспоживанням та можливістю масштабування.

3 Вихідні дані для виконання МКР

3.1 Проведення аналізу існуючих комп'ютерних систем метеорологічного моніторингу та технологій IoT і LPWAN.

3.2 Розробка структурної та функціональної схем комп'ютерної системи моніторингу погодних.

3.3 Розробка алгоритмів роботи сенсорних вузлів, шлюзу та серверної частини системи, а також програмного забезпечення для обробки та аналізу метеорологічних даних.

3.4 Дослідження та реалізація методів фільтрації, декомпозиції та прогнозування часових рядів метеорологічних даних.

3.5 Виконання економічних розрахунків з метою обґрунтування доцільності впровадження розробленої системи.

3.6 Розгляд вимог з охорони праці, електробезпеки та захисту обладнання при експлуатації бездротових IoT-систем.

4 Вимоги до виконання МКР

Головна вимога — використання технології LoRaWAN як основного каналу передачі даних та застосування сучасних методів обробки часових рядів, зокрема фільтрації, декомпозиції та статистичного прогнозування, з урахуванням обмежених обчислювальних і енергетичних ресурсів сенсорних вузлів.

5 Етапи МКР та очікувані результати

Таблиця А.1 — Етапи МКР

№ етапу	Назва етапу	Очікувані результати
1	Аналіз предметної області та існуючих рішень	Аналітичний огляд, розділ 1
2	Дослідження методів обробки метеоданих	Теоретичні дослідження, розділ 2
3	Розробка структурної та функціональної схем	Розділ 3
4	Реалізація алгоритмів системи	Програмні та алгоритмічні рішення
5	Підготовка економічної частини	Розділ 4
6	Апробація результатів	Тези, презентація

№ етапу	Назва етапу	Очікувані результати
7	Оформлення МКР	Пояснювальна записка
8	Нормоконтроль і підготовка до захисту	Завершений комплект документів

6 Матеріали, що подаються до захисту МКР

До захисту подаються: пояснювальна записка магістерської кваліфікаційної роботи, графічні та ілюстративні матеріали, відгук наукового керівника, рецензія опонента, анотації українською та іноземною мовами, презентація доповіді.

7 Порядок контролю виконання та захисту МКР

Контроль виконання етапів магістерської кваліфікаційної роботи здійснюється науковим керівником відповідно до затвердженого графіка. Захист МКР проводиться на відкритому засіданні екзаменаційної комісії, затвердженої наказом ректора університету.

8 Вимоги до оформлювання та порядок виконання МКР

8.1 При оформленні магістерської кваліфікаційної роботи використовуються нормативні документи:

- ДСТУ 3008:2015 «Звіти у сфері науки і техніки»;
- ДСТУ 8302:2015 «Бібліографічні посилання»;
- ГОСТ 2.104-2006 «Єдина система конструкторської документації»;
- документами на які посилаються у вище вказаних.

8.2 Порядок виконання МКР викладено в «Положення про кваліфікаційні роботи на другому (магістерському) рівні вищої освіти СУЯ ВНТУ — 03.02.02—П.001.01:21».

ДОДАТОК Б

Протокол перевірки кваліфікаційної роботи

Назва роботи: Комп'ютерна система моніторингу погодних умов з використанням безпроводних інтерфейсів

Тип роботи: магістерська кваліфікаційна робота

(бакалаврська кваліфікаційна робота / магістерська кваліфікаційна робота)

Підрозділ: Факультет інформаційних технологій та комп'ютерної інженерії, кафедра обчислювальної техніки, група ІКІ-24м

(кафедра, факультет, навчальна група)

Коефіцієнт подібності текстових запозичень, виявлених у роботі
системою StrikePlagiarism (КПІ) 8,5 %

Висновок щодо перевірки кваліфікаційної роботи (відмітити потрібне)

- ☐ Запозичення, виявлені у роботі, оформлені коректно і не містять ознак академічного плагіату, фабрикації, фальсифікації. Роботу прийняти до захисту.
- ☐ У роботі не виявлено ознак плагіату, фабрикації, фальсифікації, але надмірна кількість текстових запозичень та/або наявність типових розрахунків не дозволяють прийняти рішення про оригінальність та самостійність її виконання. Роботу направити на доопрацювання.
- ☐ У роботі виявлено ознаки академічного плагіату та/або в ній містяться навмисні спотворення тексту, що вказують на спроби приховування недобросовісних запозичень. Робота до захисту не приймається.

Експертна комісія:

Азаров О. Д., д.т.н., зав. каф. ОТ
(прізвище, ініціали, посада)

(підпис)

Мартинюк Т. Б., д.т.н., проф. каф. ОТ
(прізвище, ініціали, посада)

(підпис)

Особа, відповідальна за перевірку _____
(підпис)

Захарченко С. М.
(прізвище, ініціали)

З висновком експертної комісії ознайомлений(-на)

Керівник _____
(підпис)

Савицька Л. А., к.т.н., доц. каф. ОТ
(прізвище, ініціали, посада)

Здобувач 
(підпис)

Тичина Б. Р.
(прізвище, ініціали)

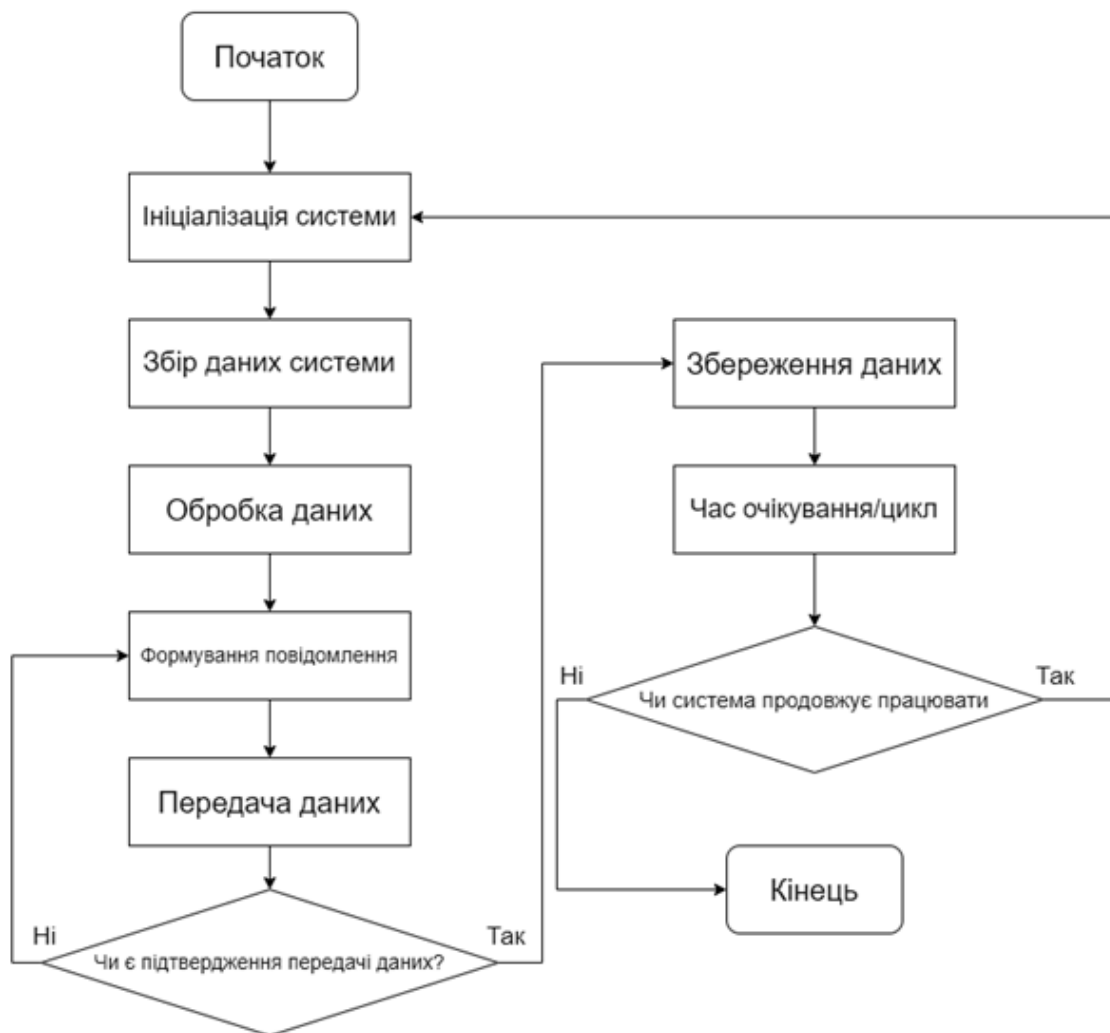
ДОДАТОК В**Алгоритм роботи передавача**

Рисунок Л 1 — Блок-схема алгоритму роботи системи (передавач)

ДОДАТОК Г

Алгоритм роботи приймача

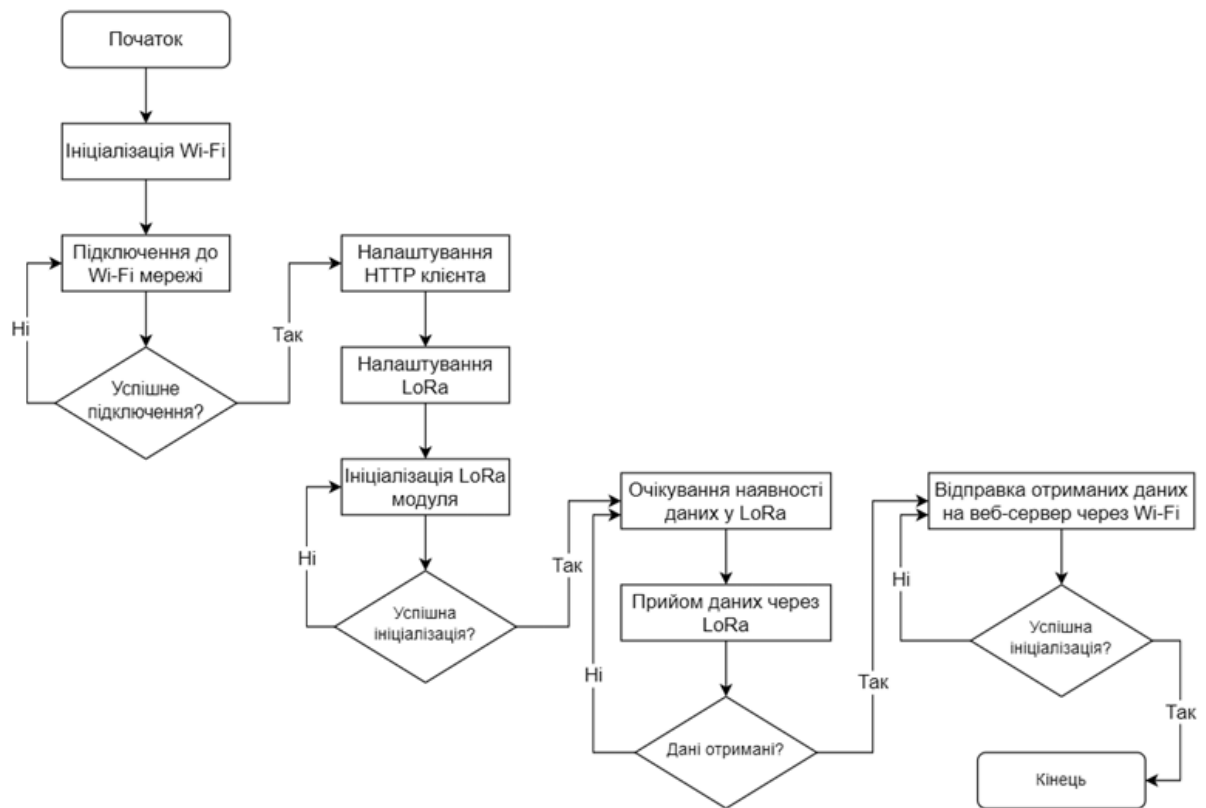


Рисунок Л 2 — Блок-схема алгоритму роботи системи (приймач)

ДОДАТОК Д

Лістинг передавача

Код для мікроконтролера Arduino Nano

```
#include <Wire.h>
#include <Adafruit_Sensor.h>
#include <Adafruit_BMP280.h>
#include <DHT.h>
#include <RH_RF95.h>

#define DHTPIN 9
#define DHTTYPE DHT11

#define RFM95_CS 6
#define RFM95_RST 5
#define RFM95_INT 2
#define RF95_FREQ 868.0 // Частота 868 MHz

DHT dht(DHTPIN, DHTTYPE);
Adafruit_BMP280 bmp; // I2C
RH_RF95 rf95(RFM95_CS, RFM95_INT);

void setup() {
  Serial.begin(9600);
  while (!Serial);

  // Initialize DHT sensor
  Serial.println("Initializing DHT sensor...");
  dht.begin();

  // Initialize BMP280 sensor
  Serial.println("Initializing BMP280 sensor...");
  if (!bmp.begin(0x76)) {
    Serial.println(F("Could not find a valid BMP280 sensor at address 0x76, check
wiring!"));
    while (1);
  } else {
    Serial.println(F("BMP280 sensor found at address 0x76"));
  }

  // Initialize LoRa module
  Serial.println("Initializing LoRa module...");
  pinMode(RFM95_RST, OUTPUT);
  digitalWrite(RFM95_RST, HIGH);

  delay(100);

  digitalWrite(RFM95_RST, LOW);
  delay(10);
  digitalWrite(RFM95_RST, HIGH);
  delay(10);

  if (!rf95.init()) {
    Serial.println("LoRa radio init failed");
    while (1);
  }

  if (!rf95.setFrequency(RF95_FREQ)) {
    Serial.println("setFrequency failed");
  }
}
```

```

    while (1);
}

rf95.setTxPower(13, false);

Serial.println("Initialization complete");
}

void loop() {
    Serial.println("Reading sensors...");

    // Read temperature from DHT11
    float temperatureDHT = dht.readTemperature();
    if (isnan(temperatureDHT)) {
        Serial.println("Failed to read from DHT sensor!");
        return;
    } else {
        Serial.print("Temperature from DHT11: ");
        Serial.print(temperatureDHT);
        Serial.println(" °C");
    }

    // Read temperature from BMP280
    float temperatureBMP = bmp.readTemperature();
    Serial.print("Temperature from BMP280: ");
    Serial.print(temperatureBMP);
    Serial.println(" °C");

    // Calculate average temperature
    float averageTemperature = (temperatureDHT + temperatureBMP) / 2.0;
    Serial.print("Average Temperature: ");
    Serial.print(averageTemperature);
    Serial.println(" °C");

    // Read other data from BMP280
    float pressure = bmp.readPressure();
    Serial.print("Pressure: ");
    Serial.print(pressure);
    Serial.println(" Pa");

    float altitude = bmp.readAltitude(1013.25); // assuming sea level pressure is
1013.25 hPa
    Serial.print("Altitude: ");
    Serial.print(altitude);
    Serial.println(" m");

    // Create message
    char message[50];
    snprintf(message, sizeof(message), "AvgTemp: %.2f C, Pressure: %.2f Pa, Altitude:
%.2f m", averageTemperature, pressure, altitude);
    Serial.print("Message: ");
    Serial.println(message);

    // Send message via LoRa
    rf95.send((uint8_t *)message, strlen(message));
    rf95.waitPacketSent();
    Serial.println("Message sent via LoRa");

    // Wait a bit before next reading
    delay(2000);
}

```

ДОДАТОК Е

Лістинг роботи приймача

Код для мікроконтролера ESP8266

```
#include <Wire.h>
#include <ESP8266WiFi.h>
#include <ESP8266HTTPClient.h>
#include <RH_RF95.h>

#define RFM95_CS D2
#define RFM95_RST D3
#define RFM95_INT D4

#define RF95_FREQ 868.0 // Частота 868 MHz

// Ваші налаштування Wi-Fi
const char* ssid = "your_SSID";
const char* password = "your_PASSWORD";

// URL вашого API
const char* serverName = "http://your_api_endpoint";

RH_RF95 rf95(RFM95_CS, RFM95_INT);

void setup() {
  Serial.begin(115200);
  while (!Serial);

  // Підключення до Wi-Fi
  Serial.println();
  Serial.println();
  Serial.print("Connecting to ");
  Serial.println(ssid);

  WiFi.begin(ssid, password);

  while (WiFi.status() != WL_CONNECTED) {
    delay(500);
    Serial.print(".");
  }

  Serial.println("");
  Serial.println("WiFi connected");
  Serial.println("IP address: ");
  Serial.println(WiFi.localIP());

  // Initialize LoRa module
  Serial.println("Initializing LoRa module...");
  pinMode(RFM95_RST, OUTPUT);
  digitalWrite(RFM95_RST, HIGH);

  delay(100);

  digitalWrite(RFM95_RST, LOW);
  delay(10);
  digitalWrite(RFM95_RST, HIGH);
  delay(10);

  if (!rf95.init()) {
```

```

    Serial.println("LoRa radio init failed");
    while (1);
}

if (!rf95.setFrequency(RF95_FREQ)) {
    Serial.println("setFrequency failed");
    while (1);
}

rf95.setTxPower(13, false);

Serial.println("Initialization complete");
}

void loop() {
    if (rf95.available()) {
        // Receive LoRa message
        uint8_t buf[RH_RF95_MAX_MESSAGE_LEN];
        uint8_t len = sizeof(buf);

        if (rf95.recv(buf, &len)) {
            buf[len] = 0; // Null-terminate the string
            Serial.print("Received: ");
            Serial.println((char*)buf);

            // Send data to API
            if (WiFi.status() == WL_CONNECTED) {
                WiFiClient client;
                HTTPClient http;

                http.begin(client, serverName);
                http.addHeader("Content-Type", "application/x-www-form-urlencoded");

                String httpRequestData = "sensorData=" + String((char*)buf);
                int httpResponseCode = http.POST(httpRequestData);

                if (httpResponseCode > 0) {
                    Serial.print("HTTP Response code: ");
                    Serial.println(httpResponseCode);
                }
                else {
                    Serial.print("Error code: ");
                    Serial.println(httpResponseCode);
                }
                http.end();
            }
            else {
                Serial.println("WiFi Disconnected");
            }
        }
    }
}

```