

Міністерство освіти і науки України
Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя

Факультет комп'ютерно-інформаційних систем і програмної інженерії
(повна назва факультету)

Кафедра комп'ютерних систем та мереж
(повна назва кафедри)

ЗАТВЕРДЖУЮ
Завідувач кафедри
Осухівська Г.М.
(підпис) (прізвище та ініціали)
«25» квітня 2026 р.

ЗАВДАННЯ
НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ

на здобуття освітнього ступеня бакалавр
(назва освітнього ступеня)

за спеціальністю 123 «Комп'ютерна інженерія»
(шифр і назва спеціальності)

студента Пришлюка Василя Васильовича
(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи Комп'ютерна система керування метеозондом на основі технології LoRa

Керівник роботи Стадник Наталія Богданівна, к.т.н.
(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

Затверджені наказом ректора від « 24 » квітня 2026 року № 4/9-189 .

2. Термін подання студентом завершеної роботи 16 червня 2026р.

3. Вихідні дані до роботи Технічне завдання

4. Зміст роботи (перелік питань, які потрібно розробити)

Вступ. 1. Аналіз технічного завдання

2. Проектна частина

3. Практична частина

4. Безпека життєдіяльності, основи охорони праці.

Висновки

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

1. Схема електрична структурна

2. Схема електрична принципова

3. Блок схема алгоритму

4. Модель макету

6. Консультанти розділів роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
<i>Безпека життєдіяльності, основи охорони праці</i>	<i>к.т.н., доц. каф. МТ Сенчишин В. С.</i>		

7. Дата видачі завдання 25.04.2026 р.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів роботи	Термін виконання етапів роботи	Примітка
1.	<i>Розробка технічного завдання</i>	<i>26.01 – 02.02</i>	
2.	<i>Робота над першим розділом «Аналіз технічного завдання»</i>	<i>03.02 – 15.02</i>	
1.	<i>Робота над другим розділом «Проєктна частина»</i>	<i>20.04 – 25.04</i>	
2.	<i>Робота над третім розділом «Практична частина»</i>	<i>26.04 – 05.05</i>	
3.	<i>Робота над четвертим розділом «Безпека життєдіяльності, основи охорони праці»</i>	<i>07.05 – 25.05</i>	
4.	<i>Оформлення пояснювальної записки і графічного матеріалу</i>	<i>26.05 – 7.06</i>	
5.	<i>Перевірка на академічний плагіат, перевірка керівником та консультантами</i>	<i>8.06 – 14.06</i>	
6.	<i>Попередній захист кваліфікаційної роботи бакалавра</i>	<i>15.06 – 21.06</i>	
7.	<i>Захист кваліфікаційної роботи бакалавра</i>	<i>25.06.2026</i>	

Студент

_____ (підпис)

Пришлюк В. В.

_____ (прізвище та ініціали)

Керівник роботи

_____ (підпис)

Стадник Н. Б.

_____ (прізвище та ініціали)

АНОТАЦІЯ

Пришлюк В. В. Комп'ютерна система керування метеозондом на основі технології LoRa: спец. 123 — комп'ютерна інженерія. Тернопіль: Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя, 2026.

Ключові слова: метеозонд, мікроконтролер, ESP32, LoRa.

Кваліфікаційна робота бакалавра складається з чотирьох розділів.

У першому розділі виконано аналіз технічного завдання, та укладено вимоги до комп'ютерної системи керування метеозондом на основі технології LoRa.

В другому розділі описується процес проектування та реалізації проекту, комп'ютерної системи керування метеозондом на основі технології LoRa. Приводиться розробка апаратного забезпечення для функціонування системи. Розглядаються бібліотеки та реалізація функцій побудованих на основі них, їх алгоритми.

В третьому розділі проводиться програмна реалізація, налаштування та тестування комп'ютерної системи керування метеозондом на основі технології LoRa.

Четвертий розділ описує безпеку життєдіяльності, основи охорони праці.

ANNOTATION

Pryshliuk V. V. Computer System for Weather Balloon Control Based on LoRa Technology: Bachelor's Graduation Thesis: speciality 123 — computer engineering. Ternopil: Ternopil Ivan Puluj National Technical University, 2026.

Keywords: weather probe, microcontroller, ESP32, LoRa.

The bachelor's qualification work consists of four sections.

The first section analyzes the technical task and concludes the requirements for a computer-based weather probe control system based on LoRa technology.

The second section describes the process of designing and implementing the project, a computer-based weather probe control system based on LoRa technology. The development of hardware for the system's operation is presented. Libraries and the implementation of functions built on their basis, their algorithms are considered.

The third section provides software implementation, configuration and testing of a computer-based weather probe control system based on LoRa technology.

The fourth section describes the safety of life, the basics of labor protection.

ЗМІСТ

СПИСОК СКОРОЧЕНЬ.....	8
ВСТУП	9
РОЗДІЛ 1 АНАЛІЗ ТЕХНІЧНОГО ЗАВДАННЯ	11
1.1 Аналіз існуючих електронних систем дослідження атмосфери для метеозондів	11
1.2 Принципи побудови електронних блоків метеозондів	14
1.3 Аналіз вимог до системи керування метеозондам.....	18
РОЗДІЛ 2 ПРОЄКТНА ЧАСТИНА.....	22
2.1 Розробка структури системи	22
2.2 Обґрунтування вибору апаратної частини системи керування	23
2.2.1 Вибір плати мікроконтролера ESP32	23
2.2.2 Вибір датчиків BME680	25
2.2.3 Вибір радіомодуля LoRa EBYTE E32-433T30D	27
2.2.4 Вибір GPS-модуля SAM-M10Q-00B	30
2.4 Проектування алгоритму роботи комп'ютерної системи	32
2.5 Опис використовуваних бібліотек.....	34
2.6 UML-діаграма станів.....	36
РОЗДІЛ 3 ПРАКТИЧНА ЧАСТИНА.....	40
3.1 Моделювання роботи системи.....	40
3.2 Опис коду програми роботи системи.....	42
РОЗДІЛ 4 БЕЗПЕКА ЖИТТЄДІЯЛЬНОСТІ, ОСНОВИ ОХОРОНИ ПРАЦІ.....	54

					КС КРБ 123.272.00.00 ПЗ			
<i>Змн.</i>	<i>Арк.</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>				
Розроб.		Пришлюк В. В.			Комп'ютерна система керування метеозондом на основі технології LoRa Пояснювальна записка	<i>Літ.</i>	<i>Арк.</i>	<i>Аркушів</i>
Перевір.		Стадник Н.Б.					6	
Реценз.		Литвиненко Я.В.				ТНТУ, каф. КС, гр. СІс-41		
Н. Контр.		Тиш Є.В.						
Затверд.		Осухівська Г.М.						

4.1 Долікарська допомога при обмороженні.....	54
4.2 Особливості заходів електробезпеки на підприємствах	56
ВИСНОВКИ.....	60
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	62
Додаток А Технічне завдання	
Додаток Б Перелік елементів	
Додаток В Код програми	

					<i>КС КРБ 123.272.00.00 ПЗ</i>	Арк.
						7
<i>Змн.</i>	<i>Арк.</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>		

СПИСОК СКОРОЧЕНЬ

CPU – Central Processing Unit

I2C — Inter-Integrated Circuit

SPI — Serial Peripheral Interface

UART — universal asynchronous receiver/transmitter

USB – Universal Serial Bus

WiFi — Wireless Fidelity

					<i>КС КРБ 123.272.00.00 ПЗ</i>	Арк.
						8
<i>Змн.</i>	<i>Арк.</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>		

ВСТУП

Сучасні метеорологічні дослідження потребують отримання достовірної інформації про стан атмосфери на різних висотах у реальному масштабі часу. Дані про температуру, вологість, атмосферний тиск, швидкість та напрямок переміщення повітряних мас є важливими для прогнозування погодних умов, дослідження кліматичних процесів, забезпечення безпеки авіації, сільського господарства, телекомунікацій та багатьох інших галузей. Одним із найбільш поширених засобів отримання таких даних є метеозонди, які дозволяють проводити вимірювання безпосередньо в атмосфері на значних висотах.

Традиційні системи збору метеорологічної інформації часто характеризуються високою вартістю обладнання, обмеженими можливостями налаштування та недостатньою гнучкістю під час проведення спеціалізованих досліджень. Розвиток сучасних мікроконтролерів, бездротових технологій зв'язку та мініатюрних сенсорів створив передумови для розроблення компактних і енергоефективних метеозондів, здатних виконувати автоматичний збір, обробку та передачу даних на великі відстані [1-4].

Особливий інтерес для таких систем становить технологія LoRa, яка забезпечує передачу даних на десятки кілометрів за низького енергоспоживання. Використання мереж LoRaWAN дозволяє організувати надійний канал зв'язку між метеозондом та наземною станцією навіть за значної віддаленості від точки запуску. Це дає змогу отримувати телеметричну інформацію протягом усього польоту та контролювати поточний стан апаратури.

Система має бути побудована на поширених і не дорогих компонентах, оскільки вона буде практично одноразова. Хоча сучасні технології мають можливість знаходити втрачені об'єкти, однак пошук буде надто дорогим в не обґрунтованим.

					КС КРБ 123.272.00.00 ПЗ	Арк.
						9
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Розроблення такої системи є актуальним завданням, оскільки дозволяє створити недороге та функціональне рішення для проведення атмосферних досліджень, моніторингу погодних умов і випробувань алгоритмів автоматичного керування висотними платформами. Результати роботи можуть бути використані як у навчальних та наукових дослідженнях, так і при створенні спеціалізованих систем дистанційного моніторингу навколишнього середовища.

					<i>КС КРБ 123.272.00.00 ПЗ</i>	Арк.
						10
<i>Змн.</i>	<i>Арк.</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>		

РОЗДІЛ 1 АНАЛІЗ ТЕХНІЧНОГО ЗАВДАННЯ

1.1 Аналіз існуючих електронних систем дослідження атмосфери для метеозондів

Метеозонди є одним із найважливіших засобів дослідження атмосфери, які дозволяють отримувати інформацію про фізичні параметри повітря на різних висотах (див. рис.1.1). На відміну від наземних метеостанцій, вони забезпечують вимірювання безпосередньо в атмосферних шарах від поверхні Землі до висот 30–40 км і більше. Сучасні електронні системи метеозондів являють собою складні вимірювально-телекомунікаційні комплекси, що складаються з набору датчиків, мікроконтролера або спеціалізованого обчислювального модуля, навігаційної системи, засобів бездротового зв'язку та автономного джерела живлення [1-4].

Основними параметрами атмосфери, які вимірюють сучасні метеозонди, є температура повітря, відносна вологість, атмосферний тиск, швидкість і напрямок вітру, географічні координати та висота польоту. У спеціалізованих дослідницьких системах додатково можуть вимірюватися концентрації озону, вуглекислого газу, метану, пилових частинок, рівень сонячної радіації, іонізація атмосфери та інші параметри. Найпоширенішими є радіозонди, які запускаються за допомогою аеростатів, наповнених гелієм або воднем. Під час підйому вони здійснюють безперервний збір інформації та передають її на наземну станцію в режимі реального часу [1-4].

Температура повітря в більшості сучасних метеозондів вимірюється в межах від $-90\text{ }^{\circ}\text{C}$ до $+60\text{ }^{\circ}\text{C}$ з точністю від $\pm 0,2$ до $\pm 0,5\text{ }^{\circ}\text{C}$. Такі діапазони необхідні для проведення вимірювань у стратосфері, де температура може опускатися нижче $-80\text{ }^{\circ}\text{C}$. Для вимірювання температури використовуються

					КС КРБ 123.272.00.00 ПЗ		
<i>Змн.</i>	<i>Арк.</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>			
Розроб.		Пришлюк В. В.			Аналіз технічного завдання		
Перевір.		Стадник Н.Б.					
Реценз.		Литвиненко Я.В.					
Н. Контр.		Тиш Є.В.					
Затверд.		Осухівська Г.М.					
					<i>Літ.</i>	<i>Арк.</i>	<i>Аркушів</i>
						11	11
					ТНТУ, каф. КС, гр. СІс-41		

високочутливі терморезистори або цифрові датчики температури, які характеризуються низькою інерційністю та високою стабільністю показів. Відносна вологість повітря вимірюється в межах від 0 до 100 % з типовою похибкою 2–5 %. Для цього застосовуються ємнісні сенсори, що реагують на зміну вологості навколишнього середовища. Атмосферний тиск зазвичай вимірюється в діапазоні від 1 до 1100 гПа, що дозволяє контролювати його зміни від поверхні Землі до верхніх шарів атмосфери [1-4].

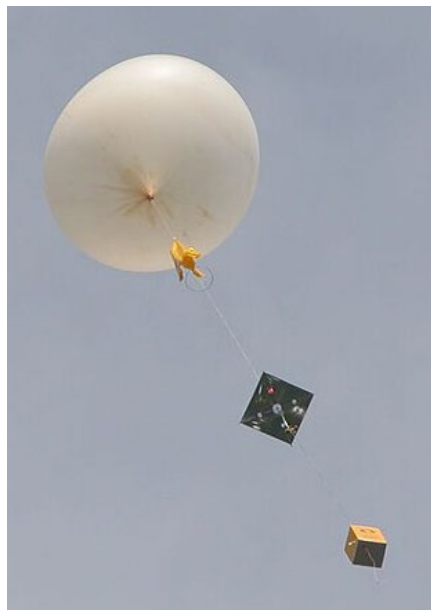


Рисунок 1.1 – Запуск метеозонда

Для визначення висоти польоту та координат використовуються супутникові навігаційні приймачі GPS, GLONASS, Galileo або BeiDou. Типовий сучасний навігаційний модуль забезпечує визначення координат з точністю до 2–5 метрів та висоти з точністю до 10–20 метрів. На основі послідовності координат програмне забезпечення наземної станції розраховує швидкість та напрямок руху повітряних мас. Таким чином відпадає необхідність у використанні окремих датчиків швидкості вітру.

Серед найбільш поширених промислових систем дослідження атмосфери можна виділити метеозонди Vaisala серії RS41, GRAW DFM-17,

					КС КРБ 123.272.00.00 ПЗ	Арк.
						12
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Meteorodem M10 та Lockheed Martin LMS6. Дані комплекси використовуються на метеорологічних станціях багатьох країн світу та забезпечують отримання високоточних даних про стан атмосфери. Наприклад, зонди серії RS41 вимірюють температуру, відносну вологість, атмосферний тиск та координати польоту, а отримані дані передаються на наземний приймач у цифровому вигляді. Під час польоту інформація оновлюється кожні 1–2 секунди, що дозволяє будувати вертикальні профілі атмосфери з високою деталізацією.

Конструктивно сучасний метеозонд складається з аеростата, електронного блоку, джерела живлення та антенної системи. Аеростат забезпечує підйом обладнання на необхідну висоту. Електронний блок містить мікроконтролер, датчики та модулі зв'язку. Для живлення зазвичай використовуються літєві батареї, здатні працювати при низьких температурах та зниженому атмосферному тиску. Антена забезпечує передачу телеметричних даних на наземну станцію. У більшості комерційних систем використовуються спеціалізовані радіоканали у діапазонах від 400 до 406 МГц, які забезпечують зв'язок на відстанях понад 200 км за прямої видимості [1-4].

Робота з метеозондом починається з підготовки польоту. Перед запуском оператор перевіряє справність обладнання, калібрує датчики та встановлює параметри місії. Після наповнення аеростата газом виконується запуск системи. Під час підйому електронний блок циклічно зчитує показники всіх датчиків, визначає координати та формує пакети телеметрії. Ці пакети передаються на наземну станцію, де спеціалізоване програмне забезпечення відображає поточні параметри польоту, будує графіки зміни температури, вологості та тиску залежно від висоти, а також прогнозує місце приземлення зонду. Після завершення польоту отримані дані архівуються та використовуються для подальшого аналізу атмосферних процесів.

					КС КРБ 123.272.00.00 ПЗ	Арк.
						13
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Останніми роками поряд із професійними метеозондами активно розвиваються аматорські та науково-дослідні системи на базі мікроконтролерів ESP32, STM32 та Arduino. Такі рішення використовують сучасні цифрові датчики BME280, BME680, SHT31, GPS-модулі серії u-blox та радіомодулі LoRa на базі мікросхем SX1276 або SX1278. Використання технології LoRa дозволяє організувати енергоефективний зв'язок на відстанях понад 100 км при польотах на великих висотах, що значно спрощує побудову наземної інфраструктури та знижує вартість системи. Крім того, сучасні мікроконтролери забезпечують реалізацію складних алгоритмів контролю справності датчиків, автоматичного керування польотом, збереження телеметрії та віддаленого налаштування параметрів місії через Wi-Fi або Bluetooth.

1.2 Принципи побудови електронних блоків метеозондів

Електронний блок є основним функціональним елементом сучасного метеозонда, оскільки саме він забезпечує збір, обробку, збереження та передачу інформації про стан атмосфери під час польоту. Принципи побудови електронних блоків метеозондів формувалися протягом багатьох десятиліть розвитку метеорологічних досліджень і сьогодні базуються на використанні сучасних мікроконтролерів, цифрових датчиків, супутникових навігаційних систем та бездротових каналів зв'язку. Основною метою побудови такого блоку є забезпечення безперервного отримання достовірних даних про параметри атмосфери в умовах значних перепадів температури, тиску, вологості та механічних навантажень, які виникають під час польоту на великих висотах [1-4].

При проектуванні електронних блоків метеозондів особлива увага приділяється мінімізації маси, енергоспоживання та габаритів обладнання. Це пов'язано з тим, що корисне навантаження аеростата повинно бути

					КС КРБ 123.272.00.00 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		14

якомога легшим для забезпечення більшої висоти підйому та тривалості польоту. Тому більшість сучасних систем будуються на основі енергоефективних мікроконтролерів, таких як ESP32, STM32, MSP430 або спеціалізованих процесорних платформ, які поєднують високу продуктивність з низьким споживанням електроенергії.

Структурно електронний блок метеозонда складається з кількох основних підсистем (див. рис.1.2) [1-4]: вимірювальної, обчислювальної, навігаційної, комунікаційної, виконавчої та підсистеми живлення. Вимірювальна підсистема призначена для контролю параметрів атмосфери та включає набір датчиків температури, вологості, атмосферного тиску та інших величин. У сучасних конструкціях переважно використовуються цифрові комбіновані сенсори, які дозволяють одночасно вимірювати декілька параметрів навколишнього середовища. Такі датчики характеризуються високою точністю, низьким енергоспоживанням та простотою інтеграції з мікроконтролером через стандартні цифрові інтерфейси.

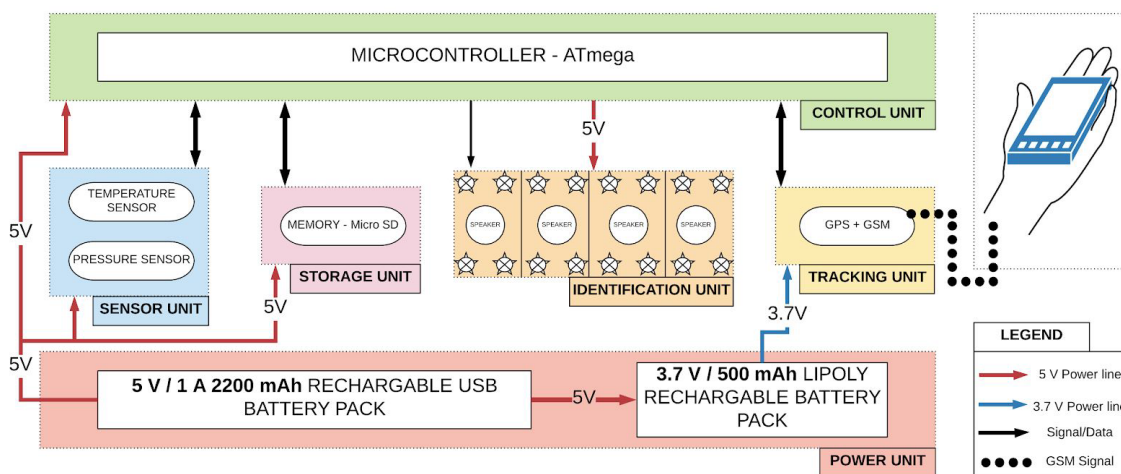


Рисунок 1.2 – Структура апаратної частини промислового метеозонда

Одним із головних принципів побудови сучасних метеозондів є забезпечення достовірності вимірювань. Для цього часто використовуються дубльовані сенсори, які виконують паралельні вимірювання одних і тих самих параметрів. Показники датчиків постійно порівнюються між собою

програмними засобами. Якщо різниця між результатами перевищує встановлені допустимі межі, система формує повідомлення про можливу несправність одного із сенсорів або про виникнення аварійної ситуації. Такий підхід дозволяє підвищити надійність роботи метеозонда та зменшити ймовірність отримання некоректних даних під час польоту.

Обчислювальна підсистема є центральною частиною електронного блоку (див. рис.1.3) [1-4]. Вона виконує опитування датчиків, обробку інформації, контроль справності обладнання, формування телеметричних пакетів та керування виконавчими пристроями. Сучасні мікроконтролери дозволяють реалізовувати складні алгоритми цифрової обробки даних, фільтрацію вимірювань, виявлення помилок та прогнозування параметрів польоту. Крім того, вони забезпечують можливість дистанційного налаштування параметрів місії перед запуском метеозонда.

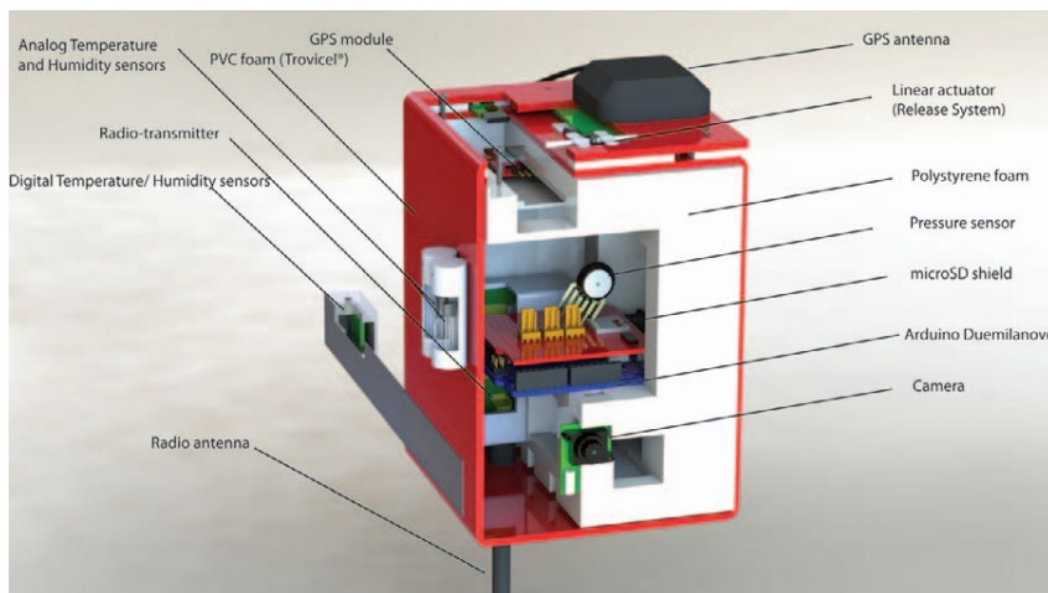


Рисунок 1.3 – Конструкція метеозонда

Важливим елементом електронного блоку є навігаційна підсистема. Для визначення координат, висоти та швидкості руху використовуються супутникові приймачі GPS, Galileo, GLONASS або BeiDou. Навігаційний модуль приймає сигнали від супутників та передає мікроконтролеру

інформацію про поточне місцезнаходження метеозонда. На основі цих даних виконується побудова траєкторії польоту, визначення швидкості переміщення та прогнозування району приземлення. Наявність навігаційної системи також дозволяє здійснювати пошук обладнання після завершення місії.

Одним із ключових принципів побудови сучасних метеозондів є використання бездротового зв'язку для передачі телеметрії на наземну станцію. Для цього застосовуються спеціалізовані радіомодулі, здатні працювати на великих відстанях за умов низького енергоспоживання. Останніми роками широкого поширення набула технологія LoRa, яка забезпечує передачу даних на десятки і навіть сотні кілометрів за умови прямої видимості між передавачем та приймачем. У висотних польотах метеозондів дальність зв'язку значно збільшується завдяки відсутності природних перешкод між апаратурою та наземною станцією. Радіомодуль формує телеметричні пакети, які містять значення температури, вологості, тиску, координат, висоти, швидкості польоту та службову інформацію про стан системи.

Для забезпечення максимальної дальності зв'язку особливу увагу приділяють конструкції антенної системи. Антена повинна мати мінімальну масу, достатній коефіцієнт підсилення та забезпечувати стабільну роботу під час обертання метеозонда в польоті. У багатьох сучасних конструкціях використовуються дипольні або спрямовані антени, які дозволяють підвищити якість радіоканалу та зменшити втрати сигналу.

Підсистема живлення є одним із найвідповідальніших елементів електронного блоку. Під час польоту на висотах понад 20–30 км температура навколишнього середовища може знижуватися до $-70\text{ }^{\circ}\text{C}$ і нижче, що негативно впливає на характеристики акумуляторів. Тому для живлення метеозондів використовуються літєві батареї спеціального виконання або елементи живлення, здатні працювати при наднизьких температурах. Крім

					КС КРБ 123.272.00.00 ПЗ	Арк.
						17
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

того, електронний блок часто оснащується стабілізаторами напруги та схемами контролю енергоспоживання, що дозволяє максимально продовжити час автономної роботи.

1.3 Аналіз вимог до системи керування метеозондам

Проектування комп'ютерної системи керування метеозондом потребує детального аналізу вимог, які визначають функціональні можливості, надійність, точність вимірювань та ефективність роботи системи в умовах реального польоту. Особливістю метеозондів є експлуатація в складних атмосферних умовах, що супроводжуються значними змінами температури, тиску, вологості та швидкості повітряних потоків. Крім того, система повинна забезпечувати стабільну роботу протягом усього польоту, який може тривати декілька годин та проходити на висотах понад 30 кілометрів. У зв'язку з цим до комп'ютерної системи керування метеозондом висувається ряд вимог, які охоплюють вимірювальну, обчислювальну, комунікаційну, навігаційну та виконавчу підсистеми [1-4].

Однією з основних вимог є забезпечення високої достовірності вимірювання атмосферних параметрів. Система повинна здійснювати безперервний контроль температури, відносної вологості та атмосферного тиску протягом усього польоту. Отримані дані мають характеризуватися достатньою точністю для проведення метеорологічних досліджень та подальшої обробки результатів. Оскільки відмова або некоректна робота одного сенсора може призвести до втрати цінної наукової інформації, доцільним є використання дубльованих датчиків. У запропонованій системі для цього застосовуються два комбіновані датчики ВМЕ680, які одночасно вимірюють температуру, вологість та атмосферний тиск [1-4]. Контролер повинен виконувати постійне порівняння показів обох сенсорів та виявляти аномальні відхилення. У випадку перевищення допустимої різниці між

					<i>КС КРБ 123.272.00.00 ПЗ</i>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		18

результатами вимірювань система повинна автоматично формувати повідомлення про можливу несправність одного з датчиків та передавати відповідну інформацію на наземну станцію.

Важливою вимогою є забезпечення безперервного визначення координат та параметрів руху метеозонда. Для цього система повинна використовувати супутниковий навігаційний модуль GPS, який забезпечує визначення географічних координат, висоти, швидкості та часу. Навігаційна інформація необхідна не лише для відстеження траєкторії польоту, але й для прогнозування місця приземлення апарата після завершення місії. Крім того, дані про координати повинні передаватися на наземну станцію разом із метеорологічною інформацією для формування повної картини польоту.

Окрему групу вимог становлять вимоги до системи бездротового зв'язку. Передача телеметричних даних повинна здійснюватися на значні відстані із мінімальними втратами інформації. Зважаючи на те, що під час польоту метеозонд може віддалятися від точки запуску на десятки або навіть сотні кілометрів, система повинна використовувати далекобійну та енергоефективну технологію зв'язку. Саме тому доцільним є застосування радіомодуля EBYTE E32-433T30D на базі мікросхеми SX1278, який реалізує технологію LoRa. Радіоканал повинен забезпечувати передачу координат, метеорологічних параметрів, службової інформації та повідомлень про стан обладнання. Важливою вимогою є також стійкість зв'язку до перешкод та можливість роботи при низьких рівнях сигналу.

Суттєвою особливістю проєктованої системи є можливість активного керування висотою польоту. На відміну від традиційних метеозондів, які після запуску рухаються відповідно до природних атмосферних процесів, запропонована система повинна мати можливість змінювати кількість газу в оболонці аеростата. Для реалізації цього завдання використовуються два сервоприводи, які керують відповідними клапанами. Перший сервопривід забезпечує відкриття клапана подачі гелію з резервного балона до оболонки

					<i>КС КРБ 123.272.00.00 ПЗ</i>	Арк.
						19
<i>Змн.</i>	<i>Арк.</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>		

метеозонда, що призводить до збільшення підйомної сили та набору висоти. Другий сервопривід відкриває клапан скидання газу, внаслідок чого підйомна сила зменшується і відбувається зниження висоти польоту. Система керування повинна забезпечувати точне позиціонування сервоприводів, контроль виконання команд та реалізацію алгоритмів автоматичного регулювання висоти.

До функціональних вимог системи належить можливість програмування місії перед запуском. Оператор повинен мати змогу задавати параметри польоту, висотні режими, часові інтервали роботи клапанів, умови спрацювання автоматичних алгоритмів та інші параметри керування. Передача налаштувань повинна здійснюватися через сучасні бездротові інтерфейси Wi-Fi або Bluetooth Low Energy без необхідності фізичного підключення до метеозонда. Це значно спрощує процес підготовки обладнання до запуску та забезпечує гнучкість налаштування системи під різні дослідницькі завдання.

Важливою вимогою є забезпечення автономності роботи системи. Після запуску метеозонда оператор не має можливості безпосередньо впливати на його обладнання, тому всі алгоритми повинні працювати повністю автоматично. Контролер повинен циклічно виконувати опитування датчиків, обробку інформації, перевірку справності системи, формування пакетів телеметрії, передачу даних та керування сервоприводами відповідно до заданої програми. У випадку виникнення аварійних ситуацій система повинна самостійно переходити до безпечного режиму роботи та повідомляти наземну станцію про виявлені несправності.

Окрему увагу необхідно приділити вимогам до надійності. Під час польоту обладнання зазнає впливу низьких температур, зниженого атмосферного тиску, підвищеної вологості та механічних вібрацій. У зв'язку з цим електронні компоненти повинні мати достатній запас надійності та працювати в розширеному температурному діапазоні. Програмне

					КС КРБ 123.272.00.00 ПЗ	Арк.
						20
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

забезпечення повинно містити механізми контролю помилок, перевірки коректності отриманих даних та автоматичного відновлення роботи окремих модулів у разі виникнення збоїв.

Важливою вимогою також є мінімізація маси та енергоспоживання системи. Збільшення ваги корисного навантаження призводить до зменшення максимальної висоти підйому та тривалості польоту. Тому всі компоненти повинні характеризуватися малими габаритами та низьким споживанням енергії. Використання мікроконтролера ESP32 дозволяє поєднати достатню обчислювальну потужність, наявність бездротових інтерфейсів та відносно низьке енергоспоживання в одному пристрої.

					<i>КС КРБ 123.272.00.00 ПЗ</i>	Арк.
						21
<i>Змн.</i>	<i>Арк.</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>		

РОЗДІЛ 2 ПРОЄКТНА ЧАСТИНА

2.1 Розробка структури системи

Комп'ютерна система керування метеозондом на основі технології LoRa наведена на рисунку 2.1:

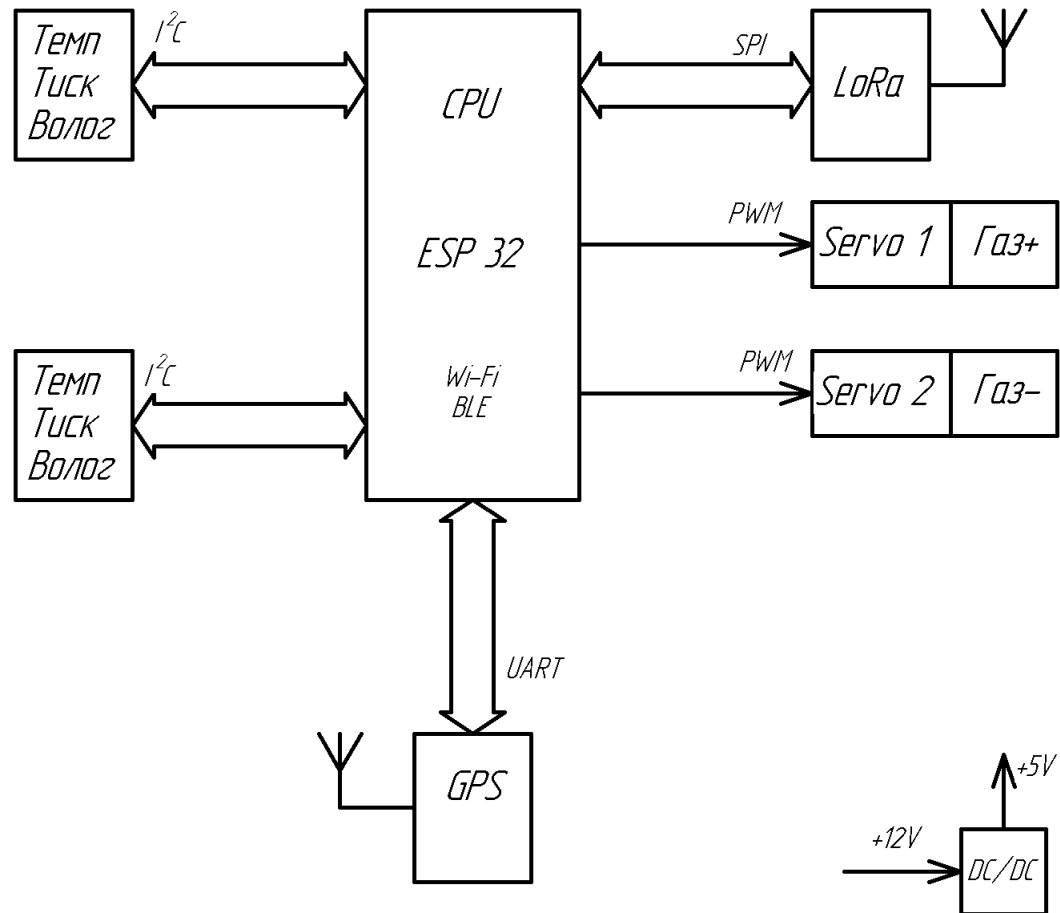


Рисунок 2.1 – Структурна схема системи

Структурна схема метеозонда складається з аеростата, електронного блоку керування, системи подачі та скидання газу, радіоканалу зв'язку і джерела живлення. Центральним елементом системи є мікроконтролер

КС КРБ 123.272.00.00 ПЗ				
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата
Розроб.		Пришлюк В. В.		
Перевір.		Стадник Н.Б.		
Реценз.		Литвиненко Я. В.		
Н. Контр.		Тиш Є.В.		
Затверд.		Осухівська Г.М.		
Проектна частина				
		Лім.	Арк.	Аркушів
			22	18
ТНТУ, каф. КС, гр. СІс-41				

ESP32, до якого підключені два датчики BME680 для вимірювання температури, вологості та атмосферного тиску, а також GPS-модуль SAM-M10Q-00B для визначення координат, висоти та швидкості польоту. Дані від датчиків надходять до ESP32, де виконуються їх обробка, порівняння показів обох BME680 для виявлення можливих несправностей та формування телеметричних повідомлень. Отримана інформація передається на радіомодуль LoRa EBYTE E32-433T30D, який через антену здійснює передачу даних на наземну станцію через мережу LoRaWAN. Перед запуском оператор за допомогою інтерфейсів Wi-Fi або Bluetooth завантажує в пам'ять ESP32 програму польоту та необхідні параметри місії. Відповідно до цієї програми мікроконтролер керує двома сервоприводами: перший відкриває клапан подачі гелію з резервного балона до оболонки аеростата для збільшення підйомної сили, а другий відкриває клапан скидання газу для зменшення висоти польоту. Усі компоненти живляться від автономного джерела живлення та працюють як єдина комп'ютерна система, що забезпечує збір метеорологічних даних, визначення координат, передачу телеметрії та автоматичне керування висотою польоту метеозонда.

2.2 Обґрунтування вибору апаратної частини системи керування

2.2.1 Вибір плати мікроконтролера ESP32

Для побудови комп'ютерної системи керування метеозондом було обрано плату мікроконтролера ESP32 (див. рис.2.2) [5-9], оскільки вона поєднує високу обчислювальну продуктивність, широкий набір периферійних інтерфейсів, низьке енергоспоживання та вбудовані засоби бездротового зв'язку. Використання ESP32 дозволяє реалізувати всі необхідні функції системи в межах одного пристрою без застосування додаткових контролерів, що сприяє зменшенню маси, габаритів та вартості обладнання. Це особливо важливо для метеозондів, оскільки кожен

					КС КРБ 123.272.00.00 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		23

додатковий грам корисного навантаження впливає на максимальну висоту та тривалість польоту.

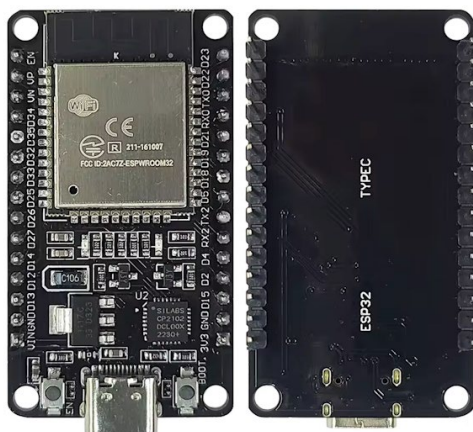


Рисунок 2.2 – Мікроконтролер ESP32

Мікроконтролер ESP32 побудований на базі двоядерного 32-бітного процесора Tensilica Xtensa LX6 з тактовою частотою до 240 МГц, що забезпечує достатню продуктивність для одночасного виконання кількох задач. У процесі роботи метеозонда контролер повинен виконувати опитування двох датчиків BME680, приймати дані від GPS-модуля SAM-M10Q-00B, здійснювати перевірку достовірності вимірювань, формувати телеметричні пакети для передачі через LoRa-модуль, керувати сервоприводами клапанів та забезпечувати роботу інтерфейсів налаштування через Wi-Fi або Bluetooth. Обчислювальних ресурсів ESP32 достатньо для реалізації всіх зазначених функцій із великим запасом продуктивності.

Важливою перевагою ESP32 є наявність великої кількості інтерфейсів введення-виведення. Контролер підтримує інтерфейси I²C, SPI, UART, PWM, ADC та інші стандартні засоби підключення периферійних пристроїв. Це дозволяє безпосередньо підключити датчики BME680 через шину I²C, GPS-модуль через UART, а модуль LoRa EBYTE E32-433T30D та сервоприводи через відповідні цифрові інтерфейси. Завдяки цьому значно спрощується структура електронної схеми та підвищується надійність роботи системи.

					КС КРБ 123.272.00.00 ПЗ	Арк.
						24
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Ще однією суттєвою перевагою ESP32 є наявність вбудованих модулів Wi-Fi та Bluetooth Low Energy. Ці інтерфейси використовуються для налаштування параметрів польоту перед запуском метеозонда. Оператор може бездротовим способом передати програму польоту, висотні обмеження, параметри роботи сервоприводів та інші службові налаштування без необхідності підключення додаткового обладнання. Така можливість значно підвищує зручність експлуатації системи та скорочує час підготовки до запуску.

Для автономних систем важливим показником є енергоспоживання. ESP32 підтримує декілька режимів енергозбереження, що дозволяє оптимізувати використання енергії під час польоту. Незважаючи на високу продуктивність, мікроконтролер характеризується прийнятним рівнем споживання струму, що забезпечує тривалу роботу від компактних джерел живлення. Крім того, плата має широкий діапазон робочих температур, що є важливим фактором при експлуатації на великих висотах, де температура повітря може знижуватися до десятків градусів нижче нуля.

Значною перевагою ESP32 є також широка поширеність та підтримка з боку розробників. Для даної платформи існує велика кількість програмних бібліотек для роботи з датчиками BME680, GPS-приймачами, LoRa-модулями та сервоприводами, що спрощує процес розроблення програмного забезпечення. Крім того, підтримка середовища Arduino IDE дозволяє швидко створювати та тестувати програмний код, що є важливим під час виконання кваліфікаційної роботи.

2.2.2 Вибір датчиків BME680

Для вимірювання основних параметрів атмосфери в розроблюваній комп'ютерній системі керування метеозондом було обрано цифрові датчики BME680 (див. рис.2.3) [5-9] виробництва компанії Bosch Sensortec. Вибір даних сенсорів обумовлений їх високою функціональністю, компактними

					КС КРБ 123.272.00.00 ПЗ	Арк.
						25
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

розмірами, низьким енергоспоживанням та можливістю одночасного вимірювання декількох параметрів навколишнього середовища. Використання одного комбінованого датчика замість декількох окремих пристроїв дозволяє суттєво зменшити масу та габарити корисного навантаження метеозонда, що є важливою перевагою для висотних аеростатних систем.



Рисунок 2.3 – Датчик VME680

Датчик VME680 забезпечує вимірювання температури повітря, відносної вологості та атмосферного тиску, а також містить вбудований газовий сенсор для оцінювання якості повітря. Для задач метеозонда основний інтерес становлять параметри температури, вологості та тиску, які використовуються для дослідження стану атмосфери на різних висотах. Діапазон вимірювання температури становить від $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ до $+85\text{ }^{\circ}\text{C}$, що дозволяє виконувати вимірювання в умовах низьких температур під час підйому метеозонда на значну висоту. Похибка вимірювання температури не перевищує $\pm 1\text{ }^{\circ}\text{C}$, що є достатнім для більшості метеорологічних досліджень. Відносна вологість вимірюється в діапазоні від 0 до 100 % з типовою похибкою близько $\pm 3\%$, а атмосферний тиск – у межах від 300 до 1100 гПа з високою роздільною здатністю та похибкою близько $\pm 1\text{ гПа}$.

Важливою перевагою VME680 є цифровий інтерфейс обміну даними I²C, який забезпечує просте підключення до мікроконтролера ESP32 та високу завадостійкість передачі інформації. Використання цифрового інтерфейсу дозволяє уникнути похибок, характерних для аналогових

					КС КРБ 123.272.00.00 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		26

датчиків, а також спрощує програмну реалізацію системи. Крім того, датчик має вбудовані засоби цифрової компенсації вимірювань та заводське калібрування, що забезпечує стабільність характеристик протягом тривалого часу експлуатації.

Для підвищення надійності роботи метеозонда у проєкті використовуються два датчики ВМЕ680. Такий підхід дозволяє реалізувати контроль достовірності вимірювань шляхом порівняння показів обох сенсорів. Мікроконтролер ESP32 постійно аналізує різницю між виміряними значеннями температури, вологості та атмосферного тиску. Якщо відхилення перевищує встановлені допустимі межі, система формує повідомлення про можливий збій або несправність одного з датчиків та передає відповідну інформацію на наземну станцію через канал зв'язку LoRa. Використання дубльованих сенсорів значно підвищує надійність роботи системи та зменшує ризик втрати важливих метеорологічних даних під час польоту.

Додатковою перевагою датчиків ВМЕ680 є низьке енергоспоживання, яке становить одиниці міліамперів у робочому режимі. Це дозволяє зменшити навантаження на автономне джерело живлення метеозонда та збільшити тривалість його роботи. Компактні розміри сенсора також сприяють зменшенню загальної маси електронного блоку, що позитивно впливає на льотні характеристики аеростата.

2.2.3 Вибір радіомодуля LoRa EBYTE E32-433T30D

Для забезпечення передачі телеметричних даних від метеозонда до наземної станції було обрано радіомодуль LoRa EBYTE E32-433T30D (див. рис.2.4) [5-9], побудований на базі мікросхеми SX1278. Вибір даного модуля обумовлений необхідністю організації надійного бездротового зв'язку на великих відстанях за умов обмеженого енергоспоживання та невеликої маси обладнання. Під час польоту метеозонд може підніматися на висоту понад 20–30 км та віддалятися від місця запуску на десятки або навіть сотні

					КС КРБ 123.272.00.00 ПЗ	Арк.
						27
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

кілометрів, тому система передачі даних повинна забезпечувати стабільний радіоканал протягом усього часу польоту.

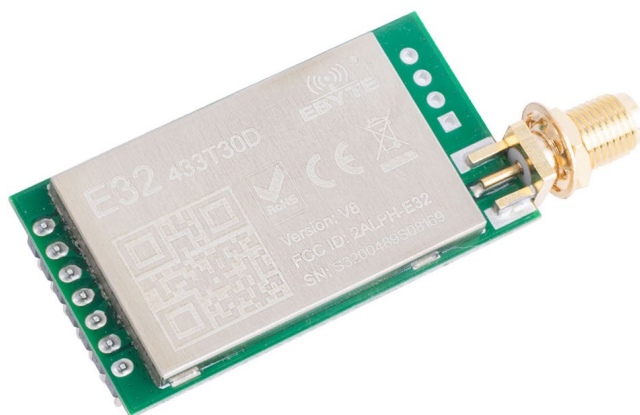


Рисунок 2.4 – Радіомодуль LoRa EBYTE E32-433T30D

Радіомодуль EBYTE E32-433T30D працює в діапазоні частот 433 МГц, який характеризується хорошими умовами поширення радіохвиль та високою дальністю зв'язку. Використання технології LoRa дозволяє передавати дані на значні відстані навіть при низькому рівні сигналу та наявності радіоперешкод. Основою роботи модуля є мікросхема SX1278 компанії Semtech, яка реалізує метод модуляції LoRa із розширеним спектром сигналу. Такий підхід забезпечує високу чутливість приймача та дозволяє приймати сигнали, рівень яких значно нижчий за рівень шумів.

Однією з головних переваг EBYTE E32-433T30D є висока вихідна потужність передавача, яка досягає 1 Вт (30 dBm). Завдяки цьому забезпечується значна дальність зв'язку без необхідності використання складних підсилювачів сигналу. У випадку висотного польоту метеозонда відсутність природних перешкод між передавачем і приймачем додатково збільшує ефективну дальність передачі даних. За сприятливих умов зв'язок може підтримуватися на відстанях у десятки кілометрів, що повністю задовольняє вимоги системи атмосферних досліджень.

Важливою перевагою модуля є простота підключення до мікроконтролера ESP32. Обмін даними здійснюється через стандартний

інтерфейс UART, що значно спрощує програмну реалізацію системи. Контролер формує телеметричні пакети, які містять результати вимірювань датчиків ВМЕ680, координати GPS-модуля SAM-M10Q-00B, висоту польоту, швидкість переміщення та службову інформацію про стан системи. Після цього сформовані пакети передаються через інтерфейс UART до радіомодуля, який виконує їх бездротову передачу на наземну станцію.

Для метеозонда особливе значення має енергоефективність обладнання. Незважаючи на високу вихідну потужність, модуль E32-433T30D підтримує різні режими роботи та енергозбереження, що дозволяє оптимізувати споживання електроенергії залежно від режиму польоту. Це дає можливість забезпечити тривалу автономну роботу системи без істотного збільшення ємності джерела живлення.

Додатковою перевагою радіомодуля є можливість програмного налаштування параметрів зв'язку, зокрема швидкості передачі даних, частотного каналу, потужності передавача та режимів корекції помилок. Це дозволяє адаптувати систему до конкретних умов експлуатації та досягати оптимального співвідношення між швидкістю передачі інформації, дальністю зв'язку та енергоспоживанням. Для передачі телеметрії метеозонда не потрібна висока швидкість обміну даними, тому можуть використовуватися режими з максимальною чутливістю приймача та найбільшою дальністю зв'язку.

Використання зовнішньої антени також є важливою перевагою E32-433T30D. У проєктованій системі передбачається застосування спрямованої антени, орієнтованої в напрямку наземної станції, що дозволяє підвищити рівень прийнятого сигналу та збільшити дальність передачі даних. Це особливо важливо під час польотів на великих висотах, коли необхідно забезпечити стабільний зв'язок протягом усього маршруту метеозонда.

					<i>КС КРБ 123.272.00.00 ПЗ</i>	Арк.
						29
<i>Змн.</i>	<i>Арк.</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>		

2.2.4 Вибір GPS-модуля SAM-M10Q-00B

Для визначення координат, висоти польоту та швидкості переміщення метеозонда у проєктованій системі було обрано супутниковий навігаційний модуль SAM-M10Q-00B компанії u-blox (див. рис.2.5) [5-9]. Вибір даного модуля обумовлений його високою точністю позиціонування, низьким енергоспоживанням, компактними розмірами та можливістю роботи одночасно з декількома глобальними навігаційними супутниковими системами. Для метеозонда навігаційна підсистема є одним із найважливіших елементів, оскільки дозволяє відстежувати траєкторію польоту, визначати поточне місцезнаходження апарата, контролювати висоту підйому та прогнозувати район його приземлення після завершення місії.



Рисунок 2.5 – Вибір GPS-модуля SAM-M10Q-00B

Модуль SAM-M10Q-00B побудований на базі сучасної платформи u-blox M10 та підтримує одночасний прийом сигналів від декількох супутникових систем, зокрема GPS, Galileo, GLONASS та BeiDou. Використання багатосистемної навігації забезпечує високу надійність визначення координат навіть у складних умовах прийому сигналів та дозволяє значно скоротити час пошуку супутників після ввімкнення пристрою. Одночасне використання декількох супутникових угруповань також підвищує точність визначення координат і зменшує вплив окремих похибок навігаційних систем.

					КС КРБ 123.272.00.00 ПЗ	Арк.
						30
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Однією з головних переваг модуля є висока точність позиціонування. За сприятливих умов експлуатації похибка визначення координат становить лише декілька метрів, що є більш ніж достатнім для задач моніторингу польоту метеозонда. Крім географічних координат, модуль формує інформацію про висоту над рівнем моря, швидкість переміщення та точний час, отриманий від супутникової навігаційної системи. Ці дані використовуються для формування телеметричних пакетів та подальшого аналізу параметрів польоту.

Важливою перевагою SAM-M10Q-00B є низьке енергоспоживання. Оскільки метеозонд працює від автономного джерела живлення протягом усього польоту, економне використання електроенергії є одним із ключових факторів під час вибору компонентів. Архітектура платформи u-blox M10 спеціально оптимізована для роботи в енергоефективних пристроях, що дозволяє зменшити навантаження на акумулятор та збільшити тривалість автономної роботи системи.

Модуль має компактні габарити та невелику масу, що також є важливою перевагою для аеростатних систем. Зменшення ваги корисного навантаження позитивно впливає на максимальну висоту підйому та тривалість польоту метеозонда. Завдяки інтегрованій конструкції та вбудованим засобам обробки навігаційних сигналів модуль не потребує складних зовнішніх схем узгодження, що спрощує проектування електронного блоку.

Для обміну даними з мікроконтролером ESP32 модуль використовує стандартний інтерфейс UART, який забезпечує просту інтеграцію в структуру системи. Отримані навігаційні дані надходять до ESP32, де виконуються їх обробка та об'єднання з інформацією від датчиків BME680. Після цього формується телеметричний пакет, який передається через радіомодуль LoRa EBYTE E32-433T30D на наземну станцію. Таким чином

					КС КРБ 123.272.00.00 ПЗ	Арк.
						31
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

оператор отримує можливість у реальному часі спостерігати за переміщенням метеозонда, його висотою та іншими параметрами польоту.

Додатковою перевагою модуля SAM-M10Q-00B є можливість роботи на великих висотах та при значних швидкостях переміщення, що є важливим для висотних аеростатів і метеозондів. Модуль стабільно підтримує навігацію протягом усього польоту та забезпечує безперервне оновлення координат навіть при значному віддаленні від точки запуску.

2.4 Проектування алгоритму роботи комп'ютерної системи

Блок схема алгоритму роботи комп'ютерної системи керування метеозондом на основі технології LoRa наведена на рис.2.6.

Алгоритм роботи комп'ютерної системи керування метеозондом починається з ініціалізації всіх апаратних модулів, зокрема мікроконтролера ESP32, двох датчиків BME680, GPS-модуля SAM-M10Q-00B, радіомодуля LoRa EBYTE E32-433T30D, сервоприводів та бездротового інтерфейсу Wi-Fi. Після запуску система створює точку доступу Wi-Fi, через яку оператор може підключитися до метеозонда та задати параметри польоту, такі як необхідна висота, допустиме відхилення від неї та період передачі телеметричних даних. Після запуску програми польоту мікроконтролер переходить у безперервний цикл роботи, в якому регулярно приймає дані від GPS-модуля та зчитує покази обох датчиків BME680.

Отримані значення температури, вологості та атмосферного тиску порівнюються між собою для контролю справності сенсорів. Якщо різниця між показами перевищує допустимі межі, формується повідомлення про можливу несправність датчика. Далі система визначає поточні координати, висоту та швидкість польоту за даними GPS-приймача. Якщо режим польоту активований і висота визначена коректно, виконується автоматичне керування клапанами.

					<i>КС КРБ 123.272.00.00 ПЗ</i>	Арк.
						32
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

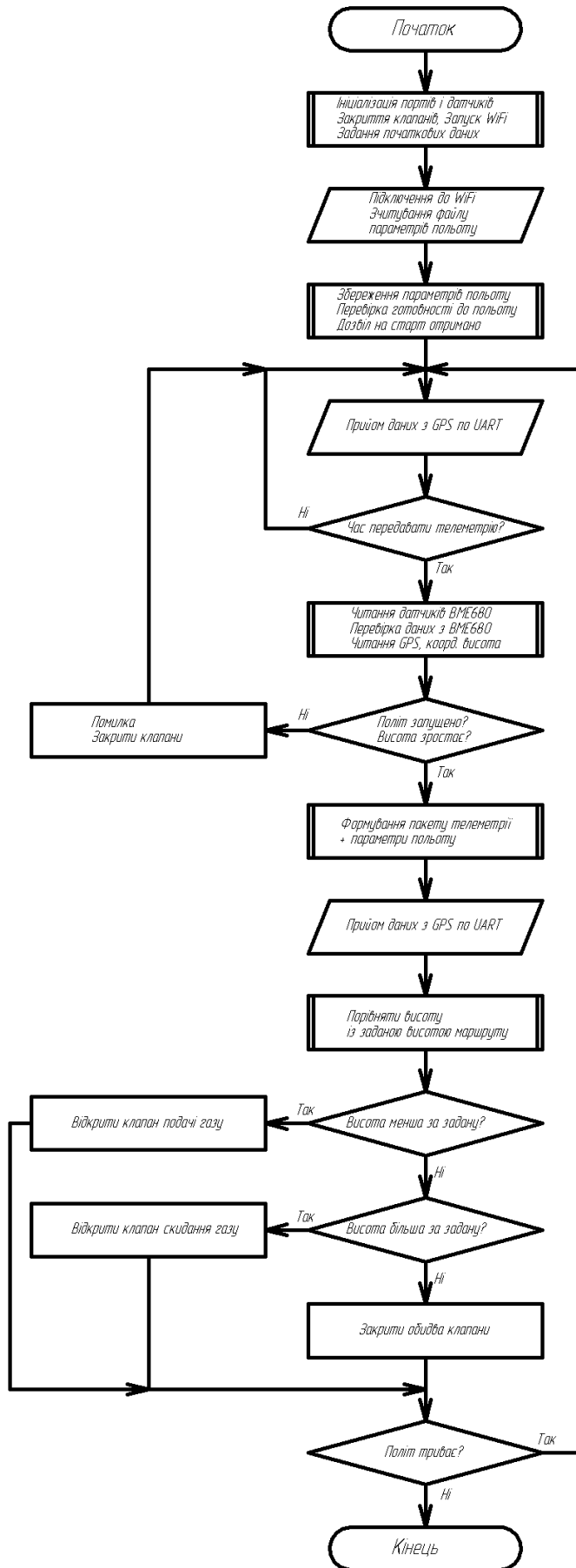


Рисунок 2.6 – Блок схема алгоритму роботи комп'ютерної системи

При зниженні висоти нижче заданого значення відкривається клапан подачі гелію з резервного балона для збільшення підйомної сили аеростата. Якщо висота перевищує встановлену межу, відкривається клапан скидання газу для зменшення висоти польоту. Коли висота знаходиться в межах допустимого діапазону, обидва клапани залишаються закритими. Після виконання всіх перевірок і керуючих дій формується пакет телеметричних даних, який містить покази датчиків, координати, висоту, швидкість, параметри польоту та стан системи. Сформований пакет передається через радіомодуль LoRa на наземну станцію, після чого цикл роботи повторюється до завершення польоту або вимкнення системи.

2.5 Опис використовуваних бібліотек

У програмному забезпеченні комп'ютерної системи керування метеозондом використовується ряд спеціалізованих бібліотек, які забезпечують взаємодію мікроконтролера ESP32 з датчиками, навігаційним обладнанням, сервоприводами та бездротовими інтерфейсами [5-9]. Використання готових програмних бібліотек значно спрощує розроблення програмного забезпечення, підвищує його надійність та скорочує час створення системи.

Бібліотека Wire.h використовується для організації обміну даними через двопровідний інтерфейс I²C. Даний інтерфейс застосовується для підключення двох датчиків BME680 до мікроконтролера ESP32. Бібліотека забезпечує формування сигналів синхронізації, передачу адрес пристроїв та обмін інформацією між контролером і сенсорами. Завдяки використанню I²C декілька пристроїв можуть працювати на одній шині даних, що дозволяє зменшити кількість необхідних провідників та спростити електричну схему метеозонда.

					<i>КС КРБ 123.272.00.00 ПЗ</i>	Арк.
						34
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Бібліотека WiFi.h призначена для реалізації бездротового інтерфейсу Wi-Fi, який використовується під час налаштування параметрів польоту перед запуском метеозонда. За допомогою цієї бібліотеки ESP32 створює власну точку доступу, до якої може підключитися оператор зі смартфона або ноутбука. Через Wi-Fi передаються параметри місії, зокрема задана висота польоту, допустимі межі відхилення та інші налаштування системи керування.

Для створення вебінтерфейсу налаштування використовується бібліотека WebServer.h. Вона дозволяє реалізувати на ESP32 повноцінний вебсервер, який обробляє HTTP-запити та формує вебсторінки для відображення у браузері користувача. За допомогою цієї бібліотеки створюється вебінтерфейс, через який оператор може переглядати поточні параметри системи, змінювати налаштування польоту, запускати або зупиняти програму автоматичного керування висотою.

Бібліотека Adafruit_Sensor.h є універсальною бібліотекою для роботи з цифровими датчиками та використовується як базовий програмний рівень для багатьох сенсорних модулів компанії Adafruit. Вона забезпечує стандартизований доступ до вимірюваних параметрів та спрощує інтеграцію різних типів сенсорів у єдину програмну систему.

Безпосередня робота з датчиками температури, вологості та атмосферного тиску виконується за допомогою бібліотеки Adafruit_BME680.h. Дана бібліотека реалізує всі необхідні функції для ініціалізації датчика BME680, налаштування режимів вимірювання та отримання результатів вимірювань. За її допомогою програма зчитує значення температури повітря, відносної вологості та атмосферного тиску, які використовуються для дослідження атмосфери та формування телеметричних повідомлень. Крім того, бібліотека дозволяє задавати параметри передискретизації та цифрової фільтрації, що підвищує точність вимірювань.

					<i>КС КРБ 123.272.00.00 ПЗ</i>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		35

Для роботи з GPS-модулем SAM-M10Q-00B використовується бібліотека TinyGPSPlus.h. Вона призначена для обробки навігаційних повідомлень формату NMEA, які надходять від GPS-приймача через послідовний інтерфейс UART. Бібліотека автоматично аналізує отримані повідомлення та виділяє з них корисну інформацію, таку як географічні координати, висота польоту, швидкість переміщення, дата та час. Завдяки цьому програмісту не потрібно самостійно розбирати текстові GPS-повідомлення, що значно спрощує розроблення програмного забезпечення.

Керування клапанами подачі та скидання гелію здійснюється за допомогою бібліотеки ESP32Servo.h. Вона реалізує генерацію PWM-сигналів, необхідних для роботи сервоприводів. Бібліотека дозволяє задавати необхідний кут повороту вала сервопривода та забезпечує точне позиціонування виконавчих механізмів. У даному проєкті один сервопривід використовується для відкриття клапана подачі гелію з резервного балона до оболонки аеростата, а другий – для відкриття клапана скидання газу з оболонки.

Для обміну даними з GPS-модулем та радіомодулем LoRa EBYTE E32-433T30D використовуються вбудовані засоби бібліотеки Arduino для роботи з апаратними послідовними портами HardwareSerial. ESP32 має декілька незалежних UART-інтерфейсів, що дозволяє одночасно працювати з GPS-приймачем та LoRa-модулем. Через один UART надходять навігаційні дані від SAM-M10Q-00B, а через інший передаються сформовані телеметричні пакети до радіомодуля E32 для подальшої передачі на наземну станцію.

2.6 UML-діаграма станів

UML-діаграма станів (див. рис.2.7) відображає логіку функціонування комп'ютерної системи керування метеозондом та послідовність переходів між основними режимами її роботи. Початковим станом є «Очікування

					КС КРБ 123.272.00.00 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		36

налаштування», який активується після ввімкнення живлення системи. У цьому стані виконується ініціалізація всіх апаратних модулів, запуск точки доступу Wi-Fi, вебсервера та очікування команд оператора. Через вебінтерфейс користувач задає параметри майбутнього польоту, зокрема необхідну висоту, допустиме відхилення від неї та інтервал передачі телеметричних даних. Після отримання команди запуску система переходить у стан «Підготовка до польоту», де виконується перевірка працездатності датчиків BME680, GPS-модуля, радіомодуля LoRa та сервоприводів, а також закриваються всі клапани керування газом.

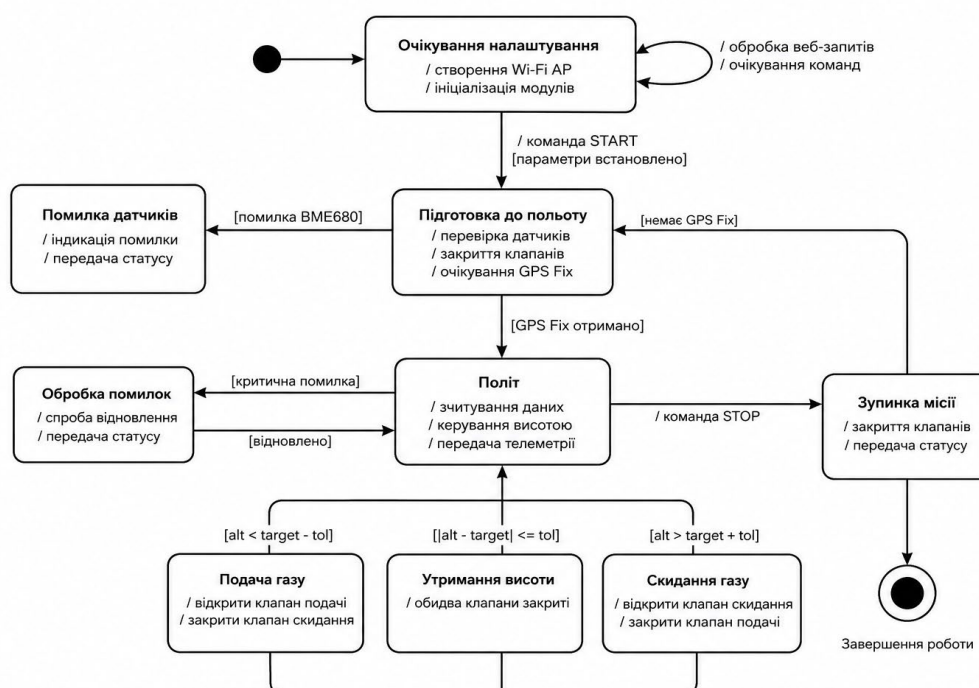


Рисунок 2.7 – UML-діаграма станів

Якщо під час перевірки виявляється несправність одного з датчиків BME680 або надмірна різниця між їх показаннями, система переходить у стан «Помилка датчиків». У цьому режимі формується повідомлення про помилку та передається відповідна інформація на наземну станцію. Після усунення несправності система може повернутися до підготовки польоту. Якщо датчики працюють коректно, контролер очікує отримання стабільного GPS-фіксування координат. За відсутності GPS-сигналу система залишається у

стані підготовки, а після успішного визначення координат переходить у стан «Політ».

Стан «Політ» є основним робочим режимом метеозонда. У цьому стані виконується безперервне зчитування показів двох датчиків ВМЕ680, прийом навігаційної інформації від GPS-модуля, контроль справності обладнання, формування телеметричних пакетів та передача даних через радіомодуль LoRa на наземну станцію. Одночасно реалізується алгоритм автоматичного керування висотою польоту. У середині стану польоту передбачені три підстани. Якщо поточна висота нижча за задану величину з урахуванням допустимого відхилення, система переходить у підстан «Подача газу», де відкривається клапан подачі гелію з резервного балона, а клапан скидання газу залишається закритим. Якщо висота перевищує встановлену межу, активується підстан «Скидання газу», у якому відкривається клапан випуску газу з оболонки аеростата. Якщо висота знаходиться в межах допустимого діапазону, система переходить у підстан «Утримання висоти», де обидва клапани залишаються закритими.

Під час польоту можливе виникнення аварійних ситуацій, пов'язаних із відмовою обладнання або критичними помилками програмного забезпечення. У такому випадку система переходить у стан «Обробка помилок», де виконується спроба відновлення нормальної роботи, повторна ініціалізація несправних модулів та передача повідомлення про аварійну ситуацію на наземну станцію. Якщо помилка успішно усувається, система повертається до стану польоту. У разі отримання команди завершення місії або після досягнення умов завершення польоту система переходить у стан «Зупинка місії». У цьому режимі закриваються всі клапани, припиняється автоматичне керування висотою та формується фінальне повідомлення про завершення роботи. Після виконання всіх завершальних операцій система переходить до кінцевого стану, який відповідає завершенню виконання програми.

					<i>КС КРБ 123.272.00.00 ПЗ</i>	Арк.
						38
<i>Змн.</i>	<i>Арк.</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>		

Таким чином, UML-діаграма станів демонструє повний життєвий цикл роботи метеозонда — від початкового налаштування та перевірки обладнання до виконання польоту, автоматичного керування висотою, обробки можливих помилок і завершення місії. Така модель дозволяє наочно представити логіку функціонування системи та спрощує розроблення програмного забезпечення для мікроконтролера ESP32.

					<i>КС КРБ 123.272.00.00 ПЗ</i>	<i>Арк.</i>
<i>Змн.</i>	<i>Арк.</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>		39

РОЗДІЛ 3 ПРАКТИЧНА ЧАСТИНА

3.1 Моделювання роботи системи

Моделювання роботи розробленої системи виконуємо в онлайн симуляторі <https://www.circuito.io/>, який моделює роботу ESP32 з різними датчиками. На початку моделювання приєднуємо два датчики ВМЕ680, які приєднуються на шину I2C (див. рис. 3.1).

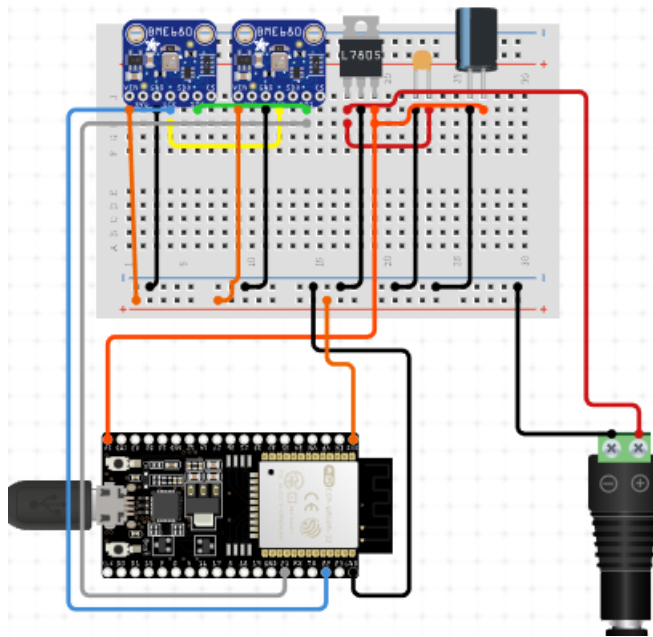


Рисунок 3.1 – Приєднання датчиків ВМЕ680

Підключені датчики ВМЕ680 є однаковими і мають однакові адреси встановлені по замовчуванню виробником, тому змінюємо адреси пристроїв на шині I2C.

Наступним кроком приєднуємо модуль GPS (див. рис. 3.2).

					КС КРБ 123.272.00.00 ПЗ			
<i>Змн.</i>	<i>Арк.</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>				
Розроб.		Пришлюк В. В.			<i>Практична частина</i>	<i>Лім.</i>	<i>Арк.</i>	<i>Аркушів</i>
Перевір.		Стадник Н.Б.					40	14
Реценз.		Литвиненко Я. В				<i>ТНТУ, каф. КС, гр. СІс-41</i>		
Н. Контр.		Тиш Є.В.						
Затверд.		Осухівська Г.М.						

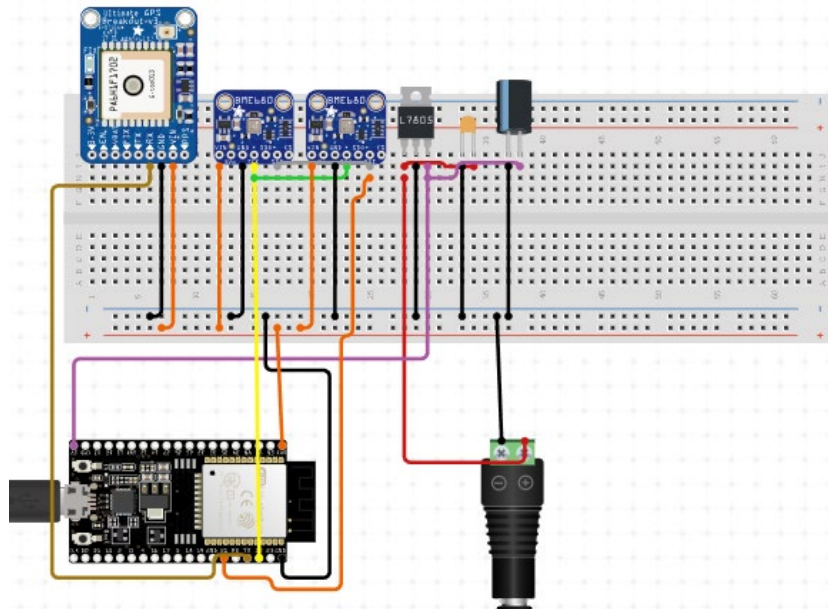


Рисунок 3.2 – Приєднання модуля GPS

Модуль GPS підключається на шину UART мікроконтролера ESP32 та перевіряється працездатність коду для обміну даними по шині.

Далі підключаємо радіо модуль LoRa на шину SPI (див. рис. 3.3)

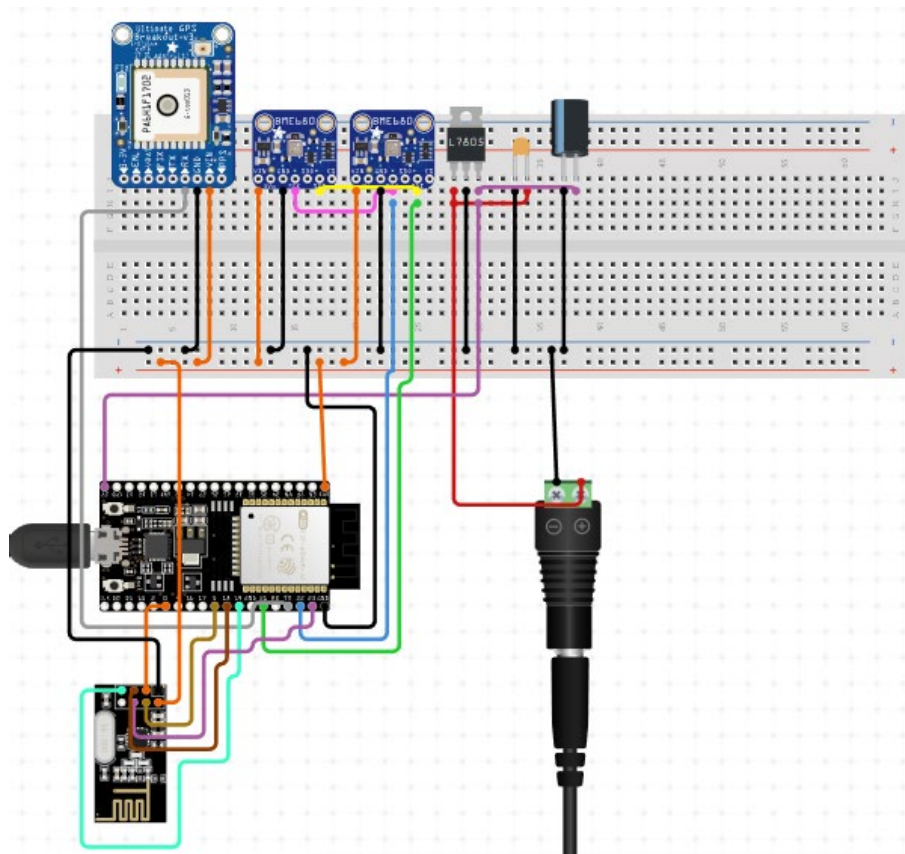


Рисунок 3.3 – Приєднання радіомодема

Приєднання сервоприводів які керуються сигналами PWM тобто ШІМ зображено на рисунку 3.4.

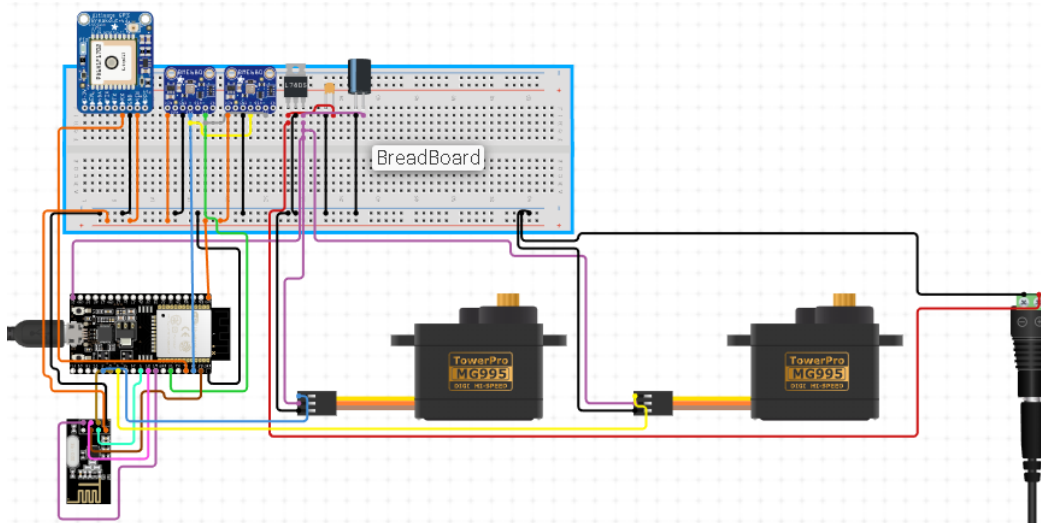


Рисунок 3.4 – Приєднання сервоприводів

Послідовне приєднання модулів дозволяє перевірити працездатність коду як по частинах так і в кінці в цілому.

3.2 Опис коду програми роботи системи

Нижче подано детальне пояснення коду по основних частинах.

На початку програми підключаються необхідні бібліотеки. Бібліотека `Wire.h` використовується для роботи з шиною I2C, через яку до ESP32 підключаються два датчики BME680. Бібліотеки `WiFi.h` та `WebServer.h` потрібні для створення точки доступу Wi-Fi і вебсторінки налаштування параметрів польоту перед запуском метеозонда. Бібліотеки `Adafruit_Sensor.h` та `Adafruit_BME680.h` забезпечують роботу з датчиками температури, вологості та тиску BME680. Бібліотека `TinyGPSPlus.h` використовується для обробки даних, які надходять від GPS-модуля SAM-M10Q-00B. Бібліотека `ESP32Servo.h` призначена для

керування сервоприводами, які відкривають і закривають клапани подачі та скидання гелію.

```
#include <Wire.h>
#include <WiFi.h>
#include <WebServer.h>
#include <Adafruit_Sensor.h>
#include <Adafruit_BME680.h>
#include <TinyGPSPlus.h>
#include <ESP32Servo.h>
```

Рисунок 3.5 – Лістинг коду підключення бібліотек

Далі в коді задаються номери виводів ESP32, до яких підключені основні компоненти системи. Для шини I2C використовуються виводи 21 та 22, які відповідають лініям SDA і SCL. GPS-модуль підключається до апаратного послідовного порту ESP32 через виводи 16 і 17. Радіомодуль LoRa EBYTE E32-433T30D підключається до іншого UART-порту через виводи 26 і 27, а додаткові виводи M0, M1 та AUX використовуються для вибору режимів роботи модуля. Два сервоприводи підключені до виводів 18 і 19.

```
#define I2C_SDA 21
#define I2C_SCL 22

#define GPS_RX 16
#define GPS_TX 17

#define LORA_RX 26
#define LORA_TX 27
#define LORA_M0 32
#define LORA_M1 33
#define LORA_AUX 25

#define SERVO_ADD_GAS_PIN 18
#define SERVO_RELEASE_GAS_PIN 19
```

Рисунок 3.5 – Лістинг коду підключення виводів

У програмі передбачено використання двох датчиків BME680. Вони підключені до однієї шини I2C, але повинні мати різні адреси: 0x76 та 0x77. Це потрібно для того, щоб ESP32 міг окремо звертатися до кожного сенсора.

					КС КРБ 123.272.00.00 ПЗ	Арк.
						43
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Якщо обидва модулі мають однакову адресу, їх неможливо напряму використовувати на одній шині I2C без додаткового I2C-мультиплексора.

```
#define BME1_ADDR 0x76
#define BME2_ADDR 0x77
```

Після цього створюються програмні об'єкти для роботи з усіма модулями. Об'єкти `bme1` і `bme2` відповідають двом датчикам BME680. Об'єкт `gps` виконує розбір навігаційних даних від GPS-модуля. Об'єкти `gpsSerial` і `loraSerial` створюють два апаратні послідовні порти ESP32: один для GPS, другий для LoRa. Об'єкти `servoAddGas` і `servoReleaseGas` відповідають сервоприводам клапанів. Об'єкт `server` створює вебсервер, через який оператор може налаштовувати програму польоту.

```
Adafruit_BME680 bme1;
Adafruit_BME680 bme2;

TinyGPSPlus gps;

HardwareSerial gpsSerial(1);
HardwareSerial loraSerial(2);

Servo servoAddGas;
Servo servoReleaseGas;

WebServer server(80);
```

Рисунок 3.6 – Лістинг коду створення об'єктів

Далі задаються параметри Wi-Fi точки доступу. ESP32 створює власну бездротову мережу з назвою `Meteozond_Config` і паролем `12345678`. До цієї мережі перед стартом може підключитися оператор зі смартфона, планшета або ноутбука, щоб задати параметри польоту. Такий підхід зручний, тому що не потребує підключення ESP32 до зовнішнього маршрутизатора.

```
const char* ssid = "Meteozond_Config";
const char* password = "12345678";
```

					КС КРБ 123.272.00.00 ПЗ	Арк.
						44
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

У блоці параметрів польоту задаються початкові значення програми польоту. Змінна `targetAltitude` визначає задану висоту, яку система повинна підтримувати. Змінна `altitudeTolerance` задає допустиме відхилення від цієї висоти. Наприклад, якщо задана висота становить 1000 м, а допуск 50 м, то система не буде відкривати клапани в межах від 950 до 1050 м. Змінна `telemetryPeriod` визначає, як часто ESP32 буде передавати телеметричні дані через LoRa. Змінна `flightStarted` показує, чи запущена програма автоматичного керування польотом.

```
float targetAltitude = 1000.0;
float altitudeTolerance = 50.0;
unsigned long telemetryPeriod = 3000;

bool flightStarted = false;
```

Окремо задаються допустимі різниці між показами двох датчиків BME680. Якщо різниця температури перевищує 3 °С, вологості — 10 %, а тиску — 5 гПа, система вважає, що один із датчиків працює некоректно. Це дозволяє реалізувати просту діагностику несправностей і підвищити достовірність вимірювань.

```
float maxTempDiff = 3.0;
float maxHumDiff = 10.0;
float maxPressDiff = 5.0;
```

Змінні `servoClosed` і `servoOpen` задають положення сервоприводів. Значення 0 відповідає закритому положенню клапана, а 90 — відкритому. У реальній конструкції ці кути потрібно підібрати експериментально залежно від механічного кріплення сервоприводів і клапанів.

```
int servoClosed = 0;
int servoOpen = 90;
```

Функція `setup()` виконується один раз після ввімкнення ESP32. У ній запускається послідовний порт для відлагодження, ініціалізується шина I2C, запускаються UART-порти для GPS і LoRa, задаються режими роботи виводів LoRa-модуля, підключаються сервоприводи, перевіряється наявність

					КС КРБ 123.272.00.00 ПЗ	Арк.
						45
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

датчиків BME680, виконується їх налаштування та запускається Wi-Fi вебсервер.

```
void setup() {  
    Serial.begin(115200);  
  
    Wire.begin(I2C_SDA, I2C_SCL);  
  
    gpsSerial.begin(9600, SERIAL_8N1, GPS_RX, GPS_TX);  
    loraSerial.begin(9600, SERIAL_8N1, LORA_RX, LORA_TX);  
}
```

Рисунок 3.7 – Лістинг коду запуску портів

Для LoRa-модуля E32 встановлюється нормальний режим роботи. Виводи M0 і M1 переводяться в низький рівень. У цьому режимі модуль працює як прозорий UART-радіоканал: все, що ESP32 передає в UART, надсилається по радіоканалу на приймальну станцію.

```
pinMode(LORA_M0, OUTPUT);  
pinMode(LORA_M1, OUTPUT);  
pinMode(LORA_AUX, INPUT);  
  
digitalWrite(LORA_M0, LOW);  
digitalWrite(LORA_M1, LOW);
```

Далі підключаються два сервоприводи і викликається функція `closeValves()`, яка переводить обидва клапани в закриті положення. Це важливо для безпечного початкового стану системи, щоб після ввімкнення метеозонда випадково не почалася подача або скидання газу.

```
servoAddGas.attach(SERVO_ADD_GAS_PIN);  
servoReleaseGas.attach(SERVO_RELEASE_GAS_PIN);  
  
closeValves();
```

Після цього програма перевіряє наявність двох датчиків BME680 за їх I2C-адресами. Якщо датчик не знайдено, у монітор порту виводиться повідомлення про помилку. Це дозволяє на етапі підготовки до запуску побачити, чи правильно підключені сенсори.

					КС КРБ 123.272.00.00 ПЗ	Арк.
						46
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

```

if (!bme1.begin(BME1_ADDR)) {
  Serial.println("Помилка: BME680 №1 не знайдено");
}

if (!bme2.begin(BME2_ADDR)) {
  Serial.println("Помилка: BME680 №2 не знайдено");
}

```

Рисунок 3.8 – Лістинг коду наявності двох датчиків BME680

Функція `configureBME()` задає режими роботи датчиків BME680. У ній встановлюється передискретизація температури, вологості та тиску, а також розмір IIR-фільтра. Газовий нагрівач вимикається, оскільки в даному проєкті основними параметрами є температура, вологість і тиск, а не оцінювання якості повітря.

```

void configureBME(Adafruit_BME680 &bme) {
  bme.setTemperatureOversampling(BME680_OS_8X);
  bme.setHumidityOversampling(BME680_OS_2X);
  bme.setPressureOversampling(BME680_OS_4X);
  bme.setIIRFilterSize(BME680_FILTER_SIZE_3);
  bme.setGasHeater(0, 0);
}

```

Рисунок 3.9 – Лістинг коду задає режими роботи датчиків BME680

Основний цикл програми `loop()` виконується постійно. У ньому обробляються запити вебсервера, зчитуються дані з GPS-модуля, періодично опитуються датчики BME680, виконується контроль висоти, формується телеметрія і передається через LoRa.

```

void loop() {
  server.handleClient();

  while (gpsSerial.available()) {
    gps.encode(gpsSerial.read());
  }
}

```

Умова з `millis()` використовується для періодичної передачі телеметрії без зупинки всієї програми. На відміну від `delay()`, такий підхід

					КС КРБ 123.272.00.00 ПЗ	Арк.
						47
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

не блокує роботу ESP32, тому вебсервер, GPS і керування сервоприводами можуть працювати паралельно.

```
if (millis() - lastTelemetryTime >= telemetryPeriod) {  
    lastTelemetryTime = millis();  
}
```

Функція `readBME()` виконує зчитування одного датчика BME680. Якщо вимірювання виконано успішно, функція записує температуру, вологість і тиск у відповідні змінні та повертає `true`. Якщо датчик не відповідає або сталася помилка, функція повертає `false`.

```
bool readBME(Adafruit_BME680 &bme, float &temperature, float  
&humidity, float &pressure) {  
    if (!bme.performReading()) {  
        return false;  
    }  
  
    temperature = bme.temperature;  
    humidity = bme.humidity;  
    pressure = bme.pressure / 100.0;  
  
    return true;  
}
```

Рисунок 3.10 – Лістинг коду зчитування одного датчика BME680

Функція `checkSensors()` аналізує справність датчиків. Спочатку перевіряється, чи відповіли обидва датчики. Якщо один або обидва датчики не працюють, формується відповідний статус помилки. Якщо обидва датчики працюють, програма порівнює їх покази. При перевищенні допустимої різниці формується попередження про розбіжність температури, вологості або тиску. Якщо всі покази в межах норми, статус дорівнює ОК.

					КС КРБ 123.272.00.00 ПЗ	Арк.
						48
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

```

String checkSensors(
    float t1, float h1, float p1,
    float t2, float h2, float p2,
    bool bme1Ok, bool bme2Ok
) {
    if (!bme1Ok && !bme2Ok) return "ERROR_BOTH_BME";
    if (!bme1Ok) return "ERROR_BME1";
    if (!bme2Ok) return "ERROR_BME2";

    if (abs(t1 - t2) > maxTempDiff) return "TEMP_SENSOR_DIFF";
    if (abs(h1 - h2) > maxHumDiff) return "HUM_SENSOR_DIFF";
    if (abs(p1 - p2) > maxPressDiff) return "PRESS_SENSOR_DIFF";

    return "OK";
}

```

Рисунок 3.11 – Лістинг коду аналізу справність датчиків

Дані GPS перевіряються на достовірність за допомогою методів `isValid()`. Якщо координати, висота або швидкість уже отримані від супутників, вони записуються у відповідні змінні. Якщо GPS ще не визначив місцезнаходження, у телеметрію записуються нульові значення. У реальній системі це дозволяє бачити, чи GPS уже отримав фіксацію координат.

```

float latitude = gps.location.isValid() ? gps.location.lat() :
0.0;
float longitude = gps.location.isValid() ? gps.location.lng() :
0.0;
float altitude = gps.altitude.isValid() ? gps.altitude.meters() :
0.0;
float speed = gps.speed.isValid() ? gps.speed.kmph() : 0.0;

```

Рисунок 3.12 – Лістинг коду, дані GPS перевіряються на достовірність

Автоматичне керування висотою виконується лише тоді, коли програма польоту запущена і GPS має достовірні дані про висоту. Якщо ці умови виконані, викликається функція `controlAltitude()`. Якщо політ не запущений або GPS ще не визначив висоту, обидва клапани залишаються закритими.

					КС КРБ 123.272.00.00 ПЗ	Арк.
						49
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

```

if (flightStarted && gps.altitude.isValid()) {
    controlAltitude(altitude);
} else {
    closeValves();
}

```

Функція `controlAltitude()` реалізує простий алгоритм підтримання висоти. Якщо поточна висота нижча за задану більше ніж на допустимий допуск, відкривається клапан подачі газу. Якщо висота вища за задану більше ніж на допуск, відкривається клапан скидання газу. Якщо висота знаходиться в допустимих межах, обидва клапани закриваються.

```

void controlAltitude(float currentAltitude) {
    if (currentAltitude < targetAltitude - altitudeTolerance) {
        addGas();
    }
    else if (currentAltitude > targetAltitude + altitudeTolerance) {
        releaseGas();
    }
    else {
        closeValves();
    }
}

```

Рисунок 3.13 – Лістинг коду підтримання висоти

Функції `addGas()`, `releaseGas()` і `closeValves()` керують сервоприводами. У режимі подачі газу відкривається перший клапан, а другий залишається закритим. У режимі скидання газу відкривається другий клапан, а перший закривається. У режимі очікування обидва клапани закриті.

```

void addGas() {
    servoAddGas.write(servoOpen);
    servoReleaseGas.write(servoClosed);
}

void releaseGas() {
    servoAddGas.write(servoClosed);
    servoReleaseGas.write(servoOpen);
}

void closeValves() {
    servoAddGas.write(servoClosed);
    servoReleaseGas.write(servoClosed);
}

```

Рисунок 3.14 – Лістинг коду керування сервоприводами

					КС КРБ 123.272.00.00 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		50

Функція `formTelemetry()` формує один текстовий рядок телеметрії. У нього записуються покази першого і другого ВМЕ680, координати, висота, швидкість, задана висота, стан програми польоту та статус системи. Такий формат зручний для передавання через LoRa і подальшого розбору на наземній станції.

```
String telemetry = formTelemetry(  
    t1, h1, p1,  
    t2, h2, p2,  
    latitude, longitude,  
    altitude, speed,  
    sensorStatus  
);
```

Передача телеметрії виконується одночасно у монітор порту та в LoRa-модуль. Виведення в `Serial` потрібне для налагодження під час розроблення, а `loraSerial.println()` передає сформований рядок у модуль EBYTE E32-433T30D, який надсилає його по радіоканалу на землю.

```
Serial.println(telemetry);  
loraSerial.println(telemetry);
```

Функція `startWiFiConfig()` створює Wi-Fi точку доступу та запускає вебсервер. ESP32 починає працювати як невеликий автономний вебпристрій. Оператор підключається до мережі `Meteozond_Config`, відкриває IP-адресу ESP32 у браузері та задає параметри польоту.

```
void startWiFiConfig() {  
    WiFi.softAP(ssid, password);  
  
    Serial.print("WiFi AP запущено. IP: ");  
    Serial.println(WiFi.softAPIP());  
  
    server.on("/", handleRoot);  
    server.on("/set", handleSet);  
    server.on("/start", handleStart);  
    server.on("/stop", handleStop);  
  
    server.begin();  
}
```

Рисунок 3.15 – Лістинг коду створення Wi-Fi точки доступу

					КС КРБ 123.272.00.00 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		51

Функція `handleRoot()` формує головну вебсторінку налаштувань. На ній відображаються поточна задана висота, допуск висоти, період телеметрії та стан польоту. Також на сторінці є форма для введення нових параметрів і посилання для запуску або зупинки програми польоту.

```
server.on("/", handleRoot);
```

Функція `handleSet()` приймає параметри, введені оператором на вебсторінці. Якщо користувач задав нову висоту, допуск або період передачі телеметрії, ці значення записуються у відповідні змінні. Після цього ESP32 повідомляє, що параметри збережено.

```
void handleSet() {
    if (server.hasArg("alt")) {
        targetAltitude = server.arg("alt").toFloat();
    }

    if (server.hasArg("tol")) {
        altitudeTolerance = server.arg("tol").toFloat();
    }

    if (server.hasArg("period")) {
        telemetryPeriod = server.arg("period").toInt();
    }

    server.send(200, "text/html", "Параметри збережено. <a href='/'>Назад</a>");
}
```

Рисунок 3.16 – Лістинг коду збереження початкових параметрів

Функція `handleStart()` переводить систему в режим активного польоту. Після її виконання змінна `flightStarted` стає `true`, і в основному циклі програми дозволяється автоматичне керування клапанами за висотою.

```
void handleStart() {
    flightStarted = true;
    server.send(200, "text/html", "Програму польоту запущено. <a href='/'>Назад</a>");
}
```

					<i>КС КРБ 123.272.00.00 ПЗ</i>	Арк.
						52
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Функція `handleStop()` зупиняє автоматичне керування польотом. Змінна `flightStarted` стає `false`, після чого обидва клапани примусово закриваються. Це потрібно для безпечного переходу системи в режим очікування.

```
void handleStop() {  
    flightStarted = false;  
    closeValves();  
    server.send(200, "text/html", "Керування польотом зупинено. <a href='/'>Назад</a>");  
}
```

Загальний алгоритм роботи програми можна описати так: після ввімкнення ESP32 ініціалізує всі модулі, закриває клапани, запускає Wi-Fi точку доступу та очікує налаштування параметрів польоту. Після запуску місії контролер циклічно зчитує дані з двох BME680, приймає координати від GPS, перевіряє справність датчиків, порівнює поточну висоту із заданою, відкриває потрібний клапан за допомогою сервоприводу та передає телеметрію через LoRa на наземну станцію.

У результаті програма реалізує основні функції комп'ютерної системи керування метеозондом: вимірювання параметрів атмосфери, контроль достовірності показів двох датчиків, визначення координат і висоти польоту, передавання даних на землю через LoRa, попереднє налаштування місії через Wi-Fi та автоматичне керування клапанами подачі й скидання гелію.

					<i>КС КРБ 123.272.00.00 ПЗ</i>	Арк.
						53
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

РОЗДІЛ 4 БЕЗПЕКА ЖИТТЄДІЯЛЬНОСТІ, ОСНОВИ ОХОРОНИ ПРАЦІ

4.1 Долікарська допомога при обмороженні

Обмороження є ушкодженням тканин організму, яке виникає внаслідок тривалої дії низьких температур. Найчастіше обмороженню піддаються відкриті або недостатньо захищені частини тіла: пальці рук і ніг, вуха, ніс, щоки. Ризик виникнення обморожень значно зростає при сильному вітрі, підвищеній вологості повітря, тісному або вологому одязі та взутті, фізичному виснаженні, голоді, захворюваннях судин, а також при вживанні алкоголю. Обмороження може призвести до серйозних порушень кровообігу, відмирання тканин і навіть втрати кінцівок, тому своєчасне надання долікарської допомоги має надзвичайно важливе значення.

Першими ознаками обмороження є відчуття холоду, поколювання, печіння та оніміння ураженої ділянки. Шкіра стає блідою, втрачає чутливість і набуває воскового вигляду. Після зігрівання можуть з'являтися біль, почервоніння та набряк. У більш тяжких випадках виникають пухирі, наповнені прозорою або кров'янистою рідиною, а при глибоких обмороженнях можливе відмирання тканин. Часто обмороження супроводжується загальним переохолодженням організму, яке проявляється ознобом, слабкістю, сонливістю, порушенням координації рухів, уповільненням дихання та серцевої діяльності.

Основним завданням долікарської допомоги є припинення дії холоду та поступове відновлення нормального кровообігу в ушкоджених тканинах. Насамперед потерпілого необхідно якомога швидше перемістити в тепле приміщення, захищене від вітру та вологи. Після цього слід зняти мокрий або холодний одяг і взуття, замінити їх сухими та теплими речами. Особливу

					КС КРБ 123.272.00.00 ПЗ			
<i>Змн.</i>	<i>Арк.</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>	Безпека життєдіяльності, основи охорони праці	<i>Літ.</i>	<i>Арк.</i>	<i>Аркушів</i>
Розроб.		Пришлюк В. В.						
Перевірив		Стадник Н.Б.					54	6
Консульт.		Сенчишин В.С.				ТНТУ, каф. КС, гр. СІс-41		
Н. Контр.		Тиш Є.В.						
Затверд.		Осухівська Г.М.						

увагу потрібно приділити загальному зігріванню організму. Потерпілого вкривають ковдрами, теплим одягом або іншими теплоізоляційними матеріалами та забезпечують фізичний і психологічний спокій.

При легких обмороженнях дозволяється поступове зігрівання уражених ділянок теплом власного тіла або перебуванням у теплому приміщенні. Для покращення кровообігу потерпілому можна давати теплі напої, наприклад чай або воду. Однак категорично забороняється використовувати дуже гарячу воду, грілки, відкритий вогонь, батареї опалення або інші інтенсивні джерела тепла, оскільки через втрату чутливості людина може отримати додаткові термічні опіки. Також не можна розтирати обморожені ділянки снігом, грубою тканиною або жорсткими предметами, оскільки це призводить до пошкодження шкіри та судин, підвищує ризик інфікування і погіршує стан потерпілого.

Після зігрівання на ушкоджені ділянки накладають сухі стерильні теплоізолюючі пов'язки, які допомагають підтримувати температуру тканин і захищають їх від зовнішніх впливів. Якщо обмороження супроводжується утворенням пухирів, їх не можна проколувати або самотійно видаляти. Пошкоджені ділянки слід захистити стерильними пов'язками та забезпечити медичний огляд. При обмороженні кінцівок необхідно обмежити їх рухливість і за можливості надати підвищене положення для зменшення набряку.

Особливу небезпеку становлять тяжкі обмороження та загальне переохолодження організму. У таких випадках потерпілий може втрачати свідомість, у нього сповільнюються пульс і дихання, знижується температура тіла. Необхідно негайно викликати швидку медичну допомогу та постійно контролювати життєво важливі функції організму. Якщо потерпілий непритомний, але дихає, його слід покласти у стабільне бокове положення. При відсутності дихання або серцевої діяльності необхідно негайно розпочати серцево-легеневу реанімацію та продовжувати її до прибуття медичних працівників.

					КС КРБ 123.272.00.00 ПЗ	Арк.
						55
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Під час надання допомоги забороняється давати потерпілому алкогольні напої. Незважаючи на короткочасне відчуття тепла, алкоголь викликає розширення судин, посилює втрату тепла організмом і сприяє погіршенню стану людини. Також не рекомендується різко зігрівати потерпілого або примушувати його до інтенсивної фізичної активності.

4.2 Особливості заходів електробезпеки на підприємствах

Електроенергія є одним із найважливіших ресурсів сучасного виробництва та широко використовується практично на всіх підприємствах незалежно від їхнього профілю діяльності. Водночас електричний струм становить серйозну небезпеку для життя і здоров'я працівників, оскільки його дія може призвести до електротравм, опіків, порушення роботи серця та органів дихання, а в окремих випадках – до смертельних наслідків. Саме тому забезпечення електробезпеки є одним із найважливіших напрямів охорони праці на підприємствах. Комплекс заходів електробезпеки включає організаційні, технічні та санітарно-гігієнічні рішення, спрямовані на захист працівників від небезпечної дії електричного струму.

Особливістю електробезпеки на підприємствах є необхідність постійного контролю за станом електроустановок, електричних мереж та обладнання. До роботи з електрообладнанням допускаються лише працівники, які пройшли спеціальне навчання, інструктаж з охорони праці та перевірку знань правил безпечної експлуатації електроустановок. Залежно від характеру виконуваних робіт працівникам присвоюються відповідні групи допуску з електробезпеки, які визначають рівень їхньої підготовки та право на виконання певних операцій.

Одним із головних технічних заходів електробезпеки є забезпечення надійної ізоляції струмопровідних частин. Усі кабелі, проводи та електричні з'єднання повинні мати справну ізоляцію, яка виключає можливість випадкового контакту людини з електричним струмом. Для захисту від

					<i>КС КРБ 123.272.00.00 ПЗ</i>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		56

ураження застосовуються спеціальні захисні кожухи, огороження та блокувальні пристрої, що унеможливають доступ до небезпечних частин обладнання під час його роботи.

Важливим засобом захисту є захисне заземлення та занулення електрообладнання. Заземлення забезпечує відведення струму в землю при пошкодженні ізоляції та появі напруги на металевих корпусах обладнання. Це значно знижує ризик ураження працівників електричним струмом. У сучасних електроустановках широко використовуються також пристрої захисного вимкнення, автоматичні вимикачі та запобіжники, які автоматично відключають живлення у разі виникнення аварійної ситуації, короткого замикання або витоку струму.

Особливе значення має організація безпечної експлуатації електрообладнання. Перед початком роботи працівник повинен переконатися у справності обладнання, перевірити цілісність ізоляції, наявність заземлення та відсутність видимих пошкоджень. Забороняється використовувати несправні електроприлади, працювати з пошкодженими кабелями або торкатися електричних елементів мокрими руками. У приміщеннях із підвищеною вологістю, високою температурою або наявністю струмопровідного пилу застосовуються додаткові заходи захисту, оскільки такі умови значно підвищують небезпеку ураження електричним струмом.

Для виконання ремонтних і профілактичних робіт використовуються спеціальні організаційні заходи. Перед початком ремонту обладнання обов'язково відключають від джерела живлення, перевіряють відсутність напруги та вживають заходів щодо запобігання випадковому ввімкненню. На вимикачах і рубильниках розміщують попереджувальні плакати та знаки безпеки. Роботи на діючих електроустановках проводяться за нарядами-допусками або спеціальними розпорядженнями відповідно до встановлених правил.

Важливою складовою електробезпеки є використання засобів індивідуального захисту. До них належать діелектричні рукавички, калоші,

					КС КРБ 123.272.00.00 ПЗ	Арк.
						57
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

килимки, ізолювальні штанги, покажчики напруги, інструмент із ізольованими ручками та інші спеціальні засоби. Перед використанням вони повинні проходити перевірку на справність та відповідність вимогам безпеки. Працівники зобов'язані користуватися такими засобами під час виконання робіт в електроустановках або поблизу них.

На підприємствах велике значення має проведення регулярних інструктажів, навчання та перевірки знань працівників з питань електробезпеки. Персонал повинен знати правила надання долікарської допомоги при ураженні електричним струмом, порядок звільнення потерпілого від дії струму та методи проведення серцево-легеневої реанімації. У разі виникнення нещасного випадку саме своєчасні та правильні дії працівників можуть врятувати життя потерпілого.

Не менш важливими є заходи пожежної безпеки, оскільки несправність електрообладнання часто стає причиною виникнення пожеж. Електричні мережі повинні відповідати встановленим нормам навантаження, а електрообладнання має регулярно проходити технічне обслуговування та профілактичні огляди. У виробничих приміщеннях повинні бути справні засоби пожежогасіння, призначені для ліквідації загорянь електрообладнання.

Специфіка заходів електробезпеки на підприємствах із виробництва електроніки визначається унікальним подвійним завданням: одночасним захистом персоналу від ураження промисловим струмом та захистом чутливих напівпровідникових компонентів від електростатичного розряду, оскільки напруга у кілька десятків вольт, непомітна для людини, здатна миттєво вивести з ладу мікросхему. Для захисту електронних модулів на виробничих майданчиках організовують спеціальні зони, захищені від статички, де діють суворі стандарти мікроклімату з підтримкою оптимальної вологості повітря в межах 40–60%, що суттєво знижує генерацію зарядів. Персонал у таких зонах обов'язково забезпечується антистатичним технологічним одягом і взуттям із провідними нитками, а під час роботи за

					КС КРБ 123.272.00.00 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		58

монтажними столами працівники підключають індивідуальні заземлювальні браслети. При цьому головний інженерний компроміс безпеки полягає в тому, що всі елементи індивідуального ESD-захисту та антистатичні килимки з'єднуються з контуром заземлення строго через вбудований захисний резистор номіналом 1 МОм; це реалізовано для того, щоб у разі аварійного контакту монтажника з оголеним фазним дротом обмежити струм через його тіло до абсолютно безпечного рівня у частки міліампера. З іншого боку, для захисту безпосередньо персоналу під час операцій тестування, прошивки та налагодження плат, де використовується мережева напруга, робочі місця в обов'язковому порядку комплектуються розділовими трансформаторами, які забезпечують гальванічну розв'язку та унеможливають замикання електричного кола через людину на землю. Додатково лінії живлення обладнуються високочутливими пристроями захисного відключення (ПЗВ) типу А або В із номіналом спрацьовування 10–30 мА, які здатні реагувати на специфічні для електронного виробництва пульсуючі струми витоку, а самі випробувальні стенди високої напруги захищаються спеціальними кожухами з автоматичними системами блокування, що миттєво знеструмлюють обладнання при відкритті захисної кришки.

					<i>КС КРБ 123.272.00.00 ПЗ</i>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		59

ВИСНОВКИ

У результаті виконання кваліфікаційної роботи бакалавра було розроблено комп'ютерну систему керування метеозондом на основі технології LoRa, призначену для дослідження параметрів атмосфери та автоматичного керування висотою польоту аеростатної платформи. У ході роботи було проведено аналіз існуючих електронних систем дослідження атмосфери, розглянуто принципи побудови сучасних метеозондів та визначено основні вимоги до системи керування, яка повинна забезпечувати високу надійність, автономність роботи та можливість передачі телеметричної інформації на значні відстані.

На основі проведеного аналізу було обґрунтовано вибір основних апаратних компонентів системи. Як центральний елемент керування використано мікроконтролер ESP32, який забезпечує достатню обчислювальну потужність, підтримку бездротових інтерфейсів Wi-Fi та Bluetooth, а також можливість підключення необхідних периферійних модулів. Для контролю параметрів атмосфери було використано два датчики BME680, що дозволяють вимірювати температуру, відносну вологість та атмосферний тиск, а також реалізувати контроль достовірності даних шляхом порівняння показів двох незалежних сенсорів. Для визначення координат і висоти польоту обрано супутниковий навігаційний модуль SAM-M10Q-00B, а для передачі телеметричної інформації на наземну станцію — радіомодуль LoRa EBYTE E32-433T30D на базі мікросхеми SX1278.

У роботі було розроблено структурну схему системи, алгоритм її функціонування, UML-діаграму станів та програмне забезпечення для мікроконтролера ESP32. Створена програма забезпечує автоматичне зчитування параметрів атмосфери, прийом навігаційних даних, контроль справності сенсорів, формування телеметричних пакетів та передачу інформації через канал LoRa. Крім того, реалізовано можливість

					<i>КС КРБ 123.272.00.00 ПЗ</i>	Арк.
						60
<i>Змн.</i>	<i>Арк.</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>		

попереднього налаштування параметрів польоту через інтерфейси Wi-Fi або Bluetooth, що підвищує гнучкість використання системи.

Особливістю розробленої системи є реалізація автоматичного керування висотою польоту метеозонда. Для цього використовуються два сервоприводи, які керують клапанами подачі та скидання гелію. На основі заданої програми польоту та поточних навігаційних даних мікроконтролер виконує автоматичне регулювання кількості газу в оболонці аеростата, забезпечуючи підтримання необхідної висоти польоту. Такий підхід дозволяє збільшити тривалість досліджень на заданих висотах та підвищити ефективність збору атмосферної інформації.

Отримані результати підтверджують можливість створення функціональної та відносно недорогої системи атмосферного моніторингу на базі сучасних мікроконтролерних технологій. Розроблена комп'ютерна система керування метеозондом може бути використана для проведення навчальних, наукових та прикладних досліджень атмосфери, а також може слугувати основою для подальшого вдосконалення висотних платформ моніторингу навколишнього середовища. Поставлені в роботі завдання виконані в повному обсязі, а мета кваліфікаційної роботи досягнута.

					<i>КС КРБ 123.272.00.00 ПЗ</i>	Арк.
						61
<i>Змн.</i>	<i>Арк.</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>		

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. ДСТУ ETSI EN 300 220-1:2018. Пристрої малої дальності дії (SRD), що працюють у діапазоні частот від 25 МГц до 1000 МГц. Технічні характеристики та методи випробувань. Київ : ДП «УкрНДНЦ», 2018.
2. ДСТУ ETSI EN 301 489-3:2018. Електромагнітна сумісність радіообладнання та служб. Стандарт електромагнітної сумісності для пристроїв малої дальності дії. Київ : ДП «УкрНДНЦ», 2018.
3. Holton J. R. An Introduction to Dynamic Meteorology. 5th ed. Amsterdam : Academic Press, 2013. 552 p.
4. Wallace J. M., Hobbs P. V. Atmospheric Science: An Introductory Survey. – 2nd ed. – Amsterdam : Elsevier Academic Press, 2006. 504 p.
5. Stull R. B. Meteorology for Scientists and Engineers. 3rd ed. Vancouver : University of British Columbia, 2017. 940 p.
6. EBYTE. E32-433T30D User Manual URL: <https://www.ebyte.com>.
7. Espressif Systems. ESP32 Series Datasheet URL: <https://www.espressif.com/en/products/socs/esp32> (дата звернення: 08.03.2026).
8. Bosch Sensortec. BME680 Environmental Sensor URL: <https://www.bosch-sensortec.com/products/environmental-sensors/gas-sensors/bme680> (дата звернення: 08.03.2026).
9. u-blox AG. SAM-M10Q Standard Precision GNSS Module Data Sheet URL: <https://www.u-blox.com> (дата звернення: 08.03.2026).
10. Жаровський Р.О., Луцик Н.С., Осухівська Г.М., Паламар А.М., Тиш Є.В. Методичні вказівки до виконання кваліфікаційної роботи бакалавра для здобувачів першого (бакалаврського) рівня вищої освіти за спеціальністю 123 «Комп. інженерія» усіх форм навчання. Тернопіль: ТНТУ, 2024. 39 с.
11. Паламар М.І., Стрембіцький М.О., Паламар А.М. Проектування комп'ютеризованих вимірювальних систем і комплексів. Навчальний посібник. Тернопіль: ТНТУ. 2019. 150 с.

					<i>КС КРБ 123.272.00.00 ПЗ</i>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		62

12. Voloskyi V., Leshchyshyn Y., Romanyshyn N., Palamar A., Tarasenko L. Method and algorithm for efficient cell balancing in the lithium-ion battery control system. CEUR Workshop Proceedings, The 1st International Workshop on Bioinformatics and Applied Information Technologies (BAIT 2024), Zboriv, Ukraine, October 02-04, 2024. Vol. 3842. P. 258-267.

13. Лецишин Ю.З., Романишин Н.Р., Наконечний В.В., Паламарчук А.О. Розробка системи зв'язку як інтегрованого елемента роботизованих систем. Проблеми створення, розвитку та застосування високотехнологічних систем спеціального призначення з урахуванням досвіду антитерористичної операції. Зб. тез доп. XXI Всеукр. Наук.-пр. конф. Житомир, 2016. С. 102.

14. Лецишин Ю.З., Назаревич Т.О., Міська І.В. Створення вбудованих систем на базі структурно - параметричних моделей цифрових каналів зв'язку. VIII Науково-технічна конференція «Інформаційні моделі, системи та технології». Тернопіль, 2020. С. 127.

15. Leschyshyn Y., Scherbak L., Nazarevych O., Gotovych V., Tymkiv P., Shymchuk G. Multicomponent Model of the Heart Rate Variability Change-point. IEEE XVth International Conference on the Perspective Technologies and Methods in MEMS Design (MEMSTECH). 2019. P. 110–113.

16. Tymkiv P., Leshchyshyn Y. Algorithm Reliability of Kalman Filter Coefficients Determination for Low-Intensity Electroretinosignal. IEEE 15th International Conference on the Experience of Designing and Application of CAD Systems (CADSM). 2019. P.1-5.

17. Leschyshyn Y., Semchyshyn O. Periodically correlated heart rate variability detection by Neyman - Pearson criterion. 9th International Conference - The Experience of Designing and Applications of CAD Systems in Microelectronics. 2007. P. 139–140.

18. Геврик Є.О. Охорона праці. К.: Ельга, Ніка-Центр, 2003. 280 с.

19. Кочін І. В., Черняков Г. О., Сидоренко П. І. Безпека життєдіяльності та цивільний захист : підручник. Київ : Здоров'я, 2019. 348 с.

					<i>КС КРБ 123.272.00.00 ПЗ</i>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		63

Додаток А
Технічне завдання

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ

Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя

Факультет комп'ютерно-інформаційних систем і програмної інженерії

Кафедра комп'ютерних систем та мереж

«Затверджую»

завідувач кафедри КС

_____ Осухівська Г.М.

“ 2 ” лютого 2026 р.

Комп'ютерна система керування метеозондом на основі технології LoRa

ТЕХНІЧНЕ ЗАВДАННЯ

На __5__ листках

Вид робіт:

Кваліфікаційна робота

На здобуття освітнього ступеня «Бакалавр»

Спеціальність 123 «Комп'ютерна інженерія»

«УЗГОДЖЕНО»

«ВИКОНАВЕЦЬ»

Керівник кваліфікаційної роботи

Студент групи СІ-41

_____ к.т.н., ст.в. Стадник Н. Б.

_____ Пришлюк В. В.

« ____ » _____ 2026 р.

« ____ » _____ 2026 р.

Тернопіль 2026

1. Назва та підстава для виконання роботи.

1.1. Комп'ютерна система керування метеозондом на основі технології LoRa.

1.2. Підставою для виконання кваліфікаційної роботи бакалавра (КРБ) є Наказ по Університету (№ 4/9-189 від 24.04.2026р.).

2. Виконавець.

2.1. Студент групи СІс-41 кафедри КС

Тернопільського національного технічного університету ім. І. Пулюя
Пришлюк Василь Васильович.

3. Мета роботи.

3.1. Метою роботи є розробити структуру та програмне забезпечення комп'ютерної системи керування метеозондом на основі технології LoRa.

4. Склад виробу.

4.1. До складу вимірювача повинні входити:

- 1) мікроконтролер ESP32;
- 2) Датчик тиску, температури, вологості;
- 3) радіомодем SX1278;
- 4) GPS-приймач;
- 5) джерело живлення;
- 6) комплект документації.

5. Технічні вимоги.

5.1. Вимоги по призначенню.

5.1.1. Комп'ютеризована система повинна мати наступні параметри:

1) Діапазон зв'язку, °МГц	433
2) Алгоритм шифрування,	AES-256
3) Точність визначення координат, не гірше, м	5
4) Дальність зв'язку, не менше, м	20000

5.1.2. Система повинна підтримувати зв'язок з планшетом

5.1.3. Система повинна живитись напругою, В $3,7\pm 2$

5.2. Вимоги до умов експлуатації:

5.2.1. Кліматичні умови експлуатації мають відповідати класу ЗК3 (або ЗК5) згідно з ДСТУ EN 60721-3-3

5.2.2. Температура експлуатації від -45 до +40°C

5.2.3. Відносна вологість до 100% при $t=25^{\circ}\text{C}$

5.3. Конструктивні вимоги.

5.3.1. Конструювання корпусу приладу в КРБ не передбачено.

5.3.2. Для побудови системи мають бути використані сучасні компоненти з можливістю поверхневого монтажу друкованого вузла.

5.3.3. При побудові системи необхідно передбачити розміщення роз'ємів живлення і обміну даними.

5.3.4. Габаритні розміри при макетуванні, мм, не більше:

довжина	200
ширина	100
висота	100

5.3.5. Маса макету, кг, не більше 0,3

5.3.6. Конструкція макету повинна забезпечувати доступ до всіх комплектуючих виробів при тестуванні.

5.4. Вимоги до надійності.

5.4.1. Система повинна відповідати вимогам ДСТУ 2862-94.

5.4.2. Наробка на відмову, не менше 10000 год.

5.5. Вимоги метрології.

5.5.1. Вимірювання параметрів системи при моделюванні повинно виконуватись на універсальних вимірювальних приладах.

6. Економічні показники.

6.1. Собівартість системи повинна бути не більше 8000 грн.

7. Вимоги до документації.

7.1. Конструкторська документація повинна відповідати вимогам ЄСКД, ДСТУ та ГОСТ.

7.2. До складу документації повинно входити:

- 1) ПЗ
- 2) Структурна схема Е1
- 3) Електрична схема Е3
- 4) Модель макета
- 5) Блок схема алгоритму роботи

8. Стадії та етапи розробки КРБ

8.1 Стадії та етапи виконання КРБ наведенні в таблиці 1.

Таблиця 1

№ етапу	Назва етапу виконання кваліфікаційної роботи бакалавра	Термін виконання
1	Розробка технічного завдання	26.01 – 02.02
2	Робота над першим розділом «Аналіз технічного завдання»	03.02 – 15.02
3	Робота над другим розділом «ПРОЄКТНА ЧАСТИНА»	20.04 – 25.04
4	Робота над третім розділом «ПРАКТИЧНА ЧАСТИНА»	26.04 – 05.05
5	Робота над четвертим розділом «Безпека життєдіяльності, основи охорони праці»	07.05 – 25.05
6	Оформлення пояснювальної записки і графічного матеріалу	26.05 – 7.06
7	Перевірка на академічний плагіат, перевірка керівником та консультантами	8.06 – 14.06
8	Попередній захист кваліфікаційної роботи бакалавра	15.06 – 21.06
9	Захист кваліфікаційної роботи бакалавра	24.06.26

9. В дане ТЗ можуть вноситись зміни по узгодженню сторін.

Додаток Б
Перелік елементів

Додаток В

Код програми

```
#include <Wire.h>
#include <WiFi.h>
#include <WebServer.h>
#include <Adafruit_Sensor.h>
#include <Adafruit_BME680.h>
#include <TinyGPSPlus.h>
#include <ESP32Servo.h>

// ----- Піни ESP32 -----
#define I2C_SDA 21
#define I2C_SCL 22

#define GPS_RX 16
#define GPS_TX 17

#define LORA_RX 26
#define LORA_TX 27
#define LORA_M0 32
#define LORA_M1 33
#define LORA_AUX 25

#define SERVO_ADD_GAS_PIN 18
#define SERVO_RELEASE_GAS_PIN 19

// ----- Адреси BME680 -----
// Один датчик має адресу 0x76, другий 0x77.
// Якщо обидва мають однакову адресу, потрібен I2C-
мультиплексор.
#define BME1_ADDR 0x76
#define BME2_ADDR 0x77

// ----- Об'єкти -----
Adafruit_BME680 bme1;
Adafruit_BME680 bme2;

TinyGPSPlus gps;

HardwareSerial gpsSerial(1);
HardwareSerial loraSerial(2);

Servo servoAddGas;
Servo servoReleaseGas;

WebServer server(80);

// ----- Wi-Fi AP -----
const char* ssid = "Meteozond_Config";
const char* password = "12345678";
```

```

// ----- Параметри польоту -----
float targetAltitude = 1000.0;      // задана висота, м
float altitudeTolerance = 50.0;     // допустиме відхилення, м
unsigned long telemetryPeriod = 3000; // період передачі, мс

bool flightStarted = false;

// ----- Пороги різниці між датчиками -----
-
float maxTempDiff = 3.0;           // °C
float maxHumDiff = 10.0;           // %
float maxPressDiff = 5.0;          // гПа

// ----- Кути сервоприводів -----
int servoClosed = 0;
int servoOpen = 90;

// ----- Змінні часу -----
unsigned long lastTelemetryTime = 0;

// -----

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

  Wire.begin(I2C_SDA, I2C_SCL);

  gpsSerial.begin(9600, SERIAL_8N1, GPS_RX, GPS_TX);
  loraSerial.begin(9600, SERIAL_8N1, LORA_RX, LORA_TX);

  pinMode(LORA_M0, OUTPUT);
  pinMode(LORA_M1, OUTPUT);
  pinMode(LORA_AUX, INPUT);

  // Нормальний режим роботи LoRa E32
  digitalWrite(LORA_M0, LOW);
  digitalWrite(LORA_M1, LOW);

  servoAddGas.attach(SERVO_ADD_GAS_PIN);
  servoReleaseGas.attach(SERVO_RELEASE_GAS_PIN);

  closeValves();

  if (!bme1.begin(BME1_ADDR)) {
    Serial.println("Помилка: BME680 №1 не знайдено");
  }

  if (!bme2.begin(BME2_ADDR)) {
    Serial.println("Помилка: BME680 №2 не знайдено");
  }

  configureBME(bme1);
  configureBME(bme2);
}

```

```

    startWiFiConfig();

    Serial.println("Система метеозонда готова до роботи");
}

// -----

void loop() {
    server.handleClient();

    while (gpsSerial.available()) {
        gps.encode(gpsSerial.read());
    }

    if (millis() - lastTelemetryTime >= telemetryPeriod) {
        lastTelemetryTime = millis();

        float t1, h1, p1;
        float t2, h2, p2;

        bool bme1Ok = readBME(bme1, t1, h1, p1);
        bool bme2Ok = readBME(bme2, t2, h2, p2);

        String sensorStatus = checkSensors(t1, h1, p1, t2, h2, p2,
            bme1Ok, bme2Ok);

        float latitude = gps.location.isValid() ? gps.location.lat()
: 0.0;
        float longitude = gps.location.isValid() ?
gps.location.lng() : 0.0;
        float altitude = gps.altitude.isValid() ?
gps.altitude.meters() : 0.0;
        float speed = gps.speed.isValid() ? gps.speed.kmph() : 0.0;

        if (flightStarted && gps.altitude.isValid()) {
            controlAltitude(altitude);
        } else {
            closeValves();
        }

        String telemetry = formTelemetry(
            t1, h1, p1,
            t2, h2, p2,
            latitude, longitude,
            altitude, speed,
            sensorStatus
        );

        Serial.println(telemetry);
        loraSerial.println(telemetry);
    }
}

```

```

// -----
void configureBME(Adafruit_BME680 &bme) {
  bme.setTemperatureOversampling(BME680_OS_8X);
  bme.setHumidityOversampling(BME680_OS_2X);
  bme.setPressureOversampling(BME680_OS_4X);
  bme.setIIRFilterSize(BME680_FILTER_SIZE_3);
  bme.setGasHeater(0, 0);
}

// -----

bool readBME(Adafruit_BME680 &bme, float &temperature, float
&humidity, float &pressure) {
  if (!bme.performReading()) {
    return false;
  }

  temperature = bme.temperature;
  humidity = bme.humidity;
  pressure = bme.pressure / 100.0;

  return true;
}

// -----

String checkSensors(
  float t1, float h1, float p1,
  float t2, float h2, float p2,
  bool bme1Ok, bool bme2Ok
) {
  if (!bme1Ok && !bme2Ok) return "ERROR_BOTH_BME";
  if (!bme1Ok) return "ERROR_BME1";
  if (!bme2Ok) return "ERROR_BME2";

  if (abs(t1 - t2) > maxTempDiff) return "TEMP_SENSOR_DIFF";
  if (abs(h1 - h2) > maxHumDiff) return "HUM_SENSOR_DIFF";
  if (abs(p1 - p2) > maxPressDiff) return "PRESS_SENSOR_DIFF";

  return "OK";
}

// -----

void controlAltitude(float currentAltitude) {
  if (currentAltitude < targetAltitude - altitudeTolerance) {
    addGas();
  }
  else if (currentAltitude > targetAltitude + altitudeTolerance)
  {
    releaseGas();
  }
}

```

```

    }
    else {
        closeValves();
    }
}

// -----

void addGas() {
    servoAddGas.write(servoOpen);
    servoReleaseGas.write(servoClosed);
}

// -----

void releaseGas() {
    servoAddGas.write(servoClosed);
    servoReleaseGas.write(servoOpen);
}

// -----

void closeValves() {
    servoAddGas.write(servoClosed);
    servoReleaseGas.write(servoClosed);
}

// -----

String formTelemetry(
    float t1, float h1, float p1,
    float t2, float h2, float p2,
    float lat, float lon,
    float alt, float speed,
    String status
) {
    String data = "";

    data += "METEOZOND;";
    data += "T1=" + String(t1, 2) + ";";
    data += "H1=" + String(h1, 2) + ";";
    data += "P1=" + String(p1, 2) + ";";

    data += "T2=" + String(t2, 2) + ";";
    data += "H2=" + String(h2, 2) + ";";
    data += "P2=" + String(p2, 2) + ";";

    data += "LAT=" + String(lat, 6) + ";";
    data += "LON=" + String(lon, 6) + ";";
    data += "ALT=" + String(alt, 2) + ";";
    data += "SPD=" + String(speed, 2) + ";";

    data += "TARGET_ALT=" + String(targetAltitude, 2) + ";";
}

```

```

    data += "FLIGHT=" + String(flightStarted ? "STARTED" : "WAIT")
+ ";";
    data += "STATUS=" + status;

    return data;
}

// -----

void startWiFiConfig() {
    WiFi.softAP(ssid, password);

    Serial.print("WiFi AP запущено. IP: ");
    Serial.println(WiFi.softAPIP());

    server.on("/", handleRoot);
    server.on("/set", handleSet);
    server.on("/start", handleStart);
    server.on("/stop", handleStop);

    server.begin();
}

// -----

void handleRoot() {
    String page = "";

    page += "<html><head><meta charset='UTF-8'></head><body>";
    page += "<h2>Налаштування метеозонда</h2>";

    page += "<p>Задана висота: " + String(targetAltitude) + "
м</p>";
    page += "<p>Допуск висоти: " + String(altitudeTolerance) + "
м</p>";
    page += "<p>Період телеметрії: " + String(telemetryPeriod) + "
мс</p>";
    page += "<p>Стан польоту: ";
    page += flightStarted ? "Запущено" : "Очікування";
    page += "</p>";

    page += "<form action='/set'>";
    page += "Задана висота, м: <input name='alt'><br>";
    page += "Допуск, м: <input name='tol'><br>";
    page += "Період телеметрії, мс: <input name='period'><br>";
    page += "<input type='submit' value='Зберегти'>";
    page += "</form>";

    page += "<br><a href='/start'>Старт польоту</a>";
    page += "<br><a href='/stop'>Зупинити керування</a>";

    page += "</body></html>";
}

```

```

    server.send(200, "text/html", page);
}

// -----

void handleSet() {
    if (server.hasArg("alt")) {
        targetAltitude = server.arg("alt").toFloat();
    }

    if (server.hasArg("tol")) {
        altitudeTolerance = server.arg("tol").toFloat();
    }

    if (server.hasArg("period")) {
        telemetryPeriod = server.arg("period").toInt();
    }

    server.send(200, "text/html", "Параметри збережено. <a
href='/'>Назад</a>");
}

// -----

void handleStart() {
    flightStarted = true;
    server.send(200, "text/html", "Програму польоту запущено. <a
href='/'>Назад</a>");
}

// -----

void handleStop() {
    flightStarted = false;
    closeValves();
    server.send(200, "text/html", "Керування польотом зупинено. <a
href='/'>Назад</a>");
}

```