

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
Чорноморський національний університет імені Петра Могили
Факультет комп'ютерних наук
Кафедра комп'ютерної інженерії

ДОПУЩЕНО ДО ЗАХИСТУ

Завідувачка кафедри,
д-р техн. наук, проф.

_____Ірина ЖУРАВСЬКА

«__» _____ 202__ р.

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА
НА ЗДОБУТТЯ ОСВІТНЬОГО СТУПЕНЯ БАКАЛАВРА
СТВОРЕННЯ ПОРТАТИВНОГО ДЕТЕКТОРА БЛИСКАВОК
НА ОСНОВІ ДАТЧИКА AS3935

Спеціальність 123 Комп'ютерна інженерія

Освітня програма «Комп'ютерна інженерія»

Здобувач

_____Андрій БАКЛАН
підпис

«__» _____ 2025р.

Керівник ст. викл. кафедри КІ

_____Борис САЛТОВСЬКИЙ
підпис

«__» _____ 2025 р.

Факультет	Комп'ютерних наук
Кафедра	Комп'ютерної інженерії
Рівень вищої освіти	Перший (бакалаврський)
Освітній ступень	Бакалавр
Спеціальність	123 Комп'ютерна інженерія
Освітня програма	Комп'ютерна інженерія

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри комп'ютерної інженерії

Ірина ЖУРАВСЬКА

«_____» _____ 2024 р.

ЗАВДАННЯ на кваліфікаційну роботу здобувача

Баклан Андрій Олександрович

(прізвище, ім'я, по батькові здобувача)

1. Тема кваліфікаційної роботи

Створення портативного детектора блискавок на основі датчика AS3935

Затверджена наказом по ЧНУ ім. Петра Могили від 30.10.2024 № 297.

2. Строк представлення кваліфікаційної роботи «_____» _____ 20__ р.

3. Очікуваний результат роботи та початкові дані, якщо такі потрібні

Створити портативний детектор блискавок на основі датчика AS3935 шляхом розробки апаратно-програмної системи з можливістю автономної роботи та виведення інформації про грозову активність у доступній нам формі.

4. Перелік питань, що підлягають розробці:

- провести огляд предметної сфери та аналіз існуючих рішень, щодо виявлення блискавок та їх технічних особливостей та мінусів використання;
- дослідити принцип роботи та характеристики датчика AS3935;
- визначити спеціальні вимоги до апаратно-програмного забезпечення, а саме виділити функціональні та нефункціональні вимоги, як система повинна функціонувати та правильно реалізовуватись;
- розробити схему апаратної частини пристрою з урахуванням вимог до портативності та енергоефективності;
- реалізувати програмне забезпечення для обробки даних із датчика AS3935 та його виведення результатів користувачу;
- протестувати пристрій в умовах, наближених до реальних, та оцінити його ефективність.

5. Перелік графічних матеріалів
Презентація

6. Консультанти:

Консультант	Кафедра (організація)	Частина роботи

Керівник роботи

Особистий підпис

Борис САЛТОВСЬКИЙ

Власне ім'я ПРИЗВИЩЕ

Здобувач

Особистий підпис

Андрій БАКЛАН

Власне ім'я ПРИЗВИЩЕ

Дата видачі завдання « _____ » _____ 2024 р.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН
виконання кваліфікаційної бакалаврської роботи

Тема: Створення портативного детектора блискавок на основі датчика AS3935

№	Найменування роботи	Початок	Закінчення	Примітки
1	Розробка та затвердження завдання на виконання КБР	30.10.2024	30.10.2024	Виконано
2	Огляд літератури за темою роботи	28.03.2025	05.04.2025	Виконано
3	Складання календарного плану КБР	10.04.2025	13.04.2025	Виконано
4	Аналіз предметної області	14.04.2025	23.04.2025	Виконано
5	Розробка проєктних рішень	25.04.2025	01.05.2025	Виконано
6	Моделювання та конструювання АПЗ	05.05.2025	15.05.2025	Виконано
7	Перевірка працездатності, тестування та апробація розробленого АПЗ, аналіз результатів тестування	16.05.2025	24.05.2025	Виконано
8	Відгук керівника КБР	11.06.2025	12.06.2025	Виконано
9	Оформлення КБР та презентації	31.05.2025	04.06.2025	Виконано
10	Попередній захист	21.05.2025	04.06.2025	Виконано
11	Рецензування	13.06.2025	16.06.2025	Виконано
12	Завершення оформлення КБР та презентації	03.06.2025	05.06.2025	Виконано
13	Захист кваліфікаційної бакалаврської роботи	24.06.2025	24.06.2025	Виконано

Керівник роботи

Особистий підпис

Борис САЛТОВСЬКИЙ

Власне ім'я ПРИЗВИЩЕ

Здобувач

Особистий підпис

Андрій БАКЛАН

Власне ім'я ПРИЗВИЩЕ

«_____» _____ 20__ р.

АНОТАЦІЯ

до кваліфікаційної бакалаврської роботи

«Створення портативного детектора блискавок на основі датчика AS3935»

Студент 405 гр.: Баклан Андрій Олександрович

Керівник: ст. викладач Салтовський Борис Григорович

У сучасних умовах глобальних кліматичних змін та зростання кількості екстремальних погодних явищ актуальною є проблема своєчасного виявлення грозової активності, зокрема блискавок, які можуть завдавати шкоди електронному обладнанню, інфраструктурі та становити загрозу для життя людей. Особливу важливість це питання має для польового використання у військовій сфері, сільському господарстві та рятувальних операціях.

Об'єктом дослідження є процес виявлення атмосферної електричної активності.

Предмет дослідження – апаратно-програмна система для виявлення блискавок.

Мета роботи – розробити портативний детектор блискавок, здатний до автономної роботи, з виведенням інформації про грозову активність.

Практична значущість роботи полягає у створенні пристрою, який може використовуватись у мобільних умовах без прив'язки до мережі живлення, що робить його корисним для військових, фермерів, туристів, рятувальників тощо.

Апробація роботи була здійснена у межах Всеукраїнської науково-практичної конференції «Могилянські читання – 2024: досвід та тенденції розвитку суспільства в Україні: глобальний, національний та регіональний аспекти» (секція 22: «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології»), яка відбувалась 6 листопада 2024р. у місті Миколаїв.

У пояснювальній записці викладено анотація двома мовами, зміст, перелік скорочень, вступ, три розділи та висновок.

У першому розділі проведено аналіз існуючих систем для виявлення блискавок та розглянуто обмеження комерційних рішень.

У другому розділі обґрунтовано вибір мікроконтролера та сенсора, сформульовано технічні вимоги до пристрою, а також спроектовано апаратну складову.

У третьому розділі описано програмну реалізацію, налагодження взаємодії з датчиком AS 3935, вивід інформації на дисплей, а також тестування пристрою. На основі результатів тестування підтверджено працездатність системи та доцільності обраного технічного рішення.

Кваліфікаційна бакалаврська робота викладена на 64 сторінках (без додатків), містить 6 таблиць, 32 рисунків, 22 джерела посилання, 4 додатки.

Ключові слова: блискавка, грозова активність, AS3935, мікроконтролер ES32, сенсор, Arduino IDE, C++.

ABSTRACT

of the Bachelor's Thesis

"Development of a portable lightning detector based on the AS3935 sensor"

Student: Andrii Baklan

Supervisor: Senior Lecturer Borys Saltovskiy

In the current context of global climate change and the growing number of extreme weather events, the problem of timely detection of thunderstorm activity, including lightning, which can cause damage to electronic equipment, infrastructure, and pose a threat to human life, is of great importance. This issue is especially important for field use in the military, agriculture, and rescue operations.

The object of research is the process of detecting atmospheric electrical activity.

The subject of research is a hardware and software system for lightning detection.

The purpose of the work is to develop a portable lightning detector capable of autonomous operation, with the output of information about thunderstorm activity.

The practical significance of the work is to create a device that can be used in mobile conditions without being tied to a power supply network, which makes it useful for the military, farmers, tourists, rescuers, etc.

The work was tested at the All-Ukrainian Scientific and Practical Conference "Mohyla Readings – 2024: Experience and Trends in the Development of Society in Ukraine: Global, National and Regional Aspects" (Section 22: "Automation and Computer-Integrated Technologies"), which took place on November 6, 2024, Mykolaiv.

The explanatory note includes an abstract in two languages, a table of contents, a list of abbreviations, an introduction, three chapters, and a conclusion.

The first section analyzes existing lightning detection systems and discusses the limitations of commercial solutions.

The second section justifies the choice of microcontroller and sensor, formulates technical requirements for the device, and designs the hardware component.

The third section describes the software implementation, the establishment of interaction with the AS 3935 sensor, the display of information, and the testing of the device. Based on the test results, the system operability and the feasibility of the chosen technical solution were confirmed.

The bachelor's thesis is set out on 64 pages (without appendices), contains 6 tables, 32 figures, 22 references and 4 appendices.

Keywords: lightning, thunderstorm activity, AS3935, ES32 microcontroller, sensor, Arduino IDE, C++.

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ.....	4
ВСТУП	5
1 АНАЛІЗ ІСНУЮЧИХ РІШЕНЬ У СФЕРІ РОЗПІЗНАВАННЯ БЛИСКАВОК ТА ФОРМУВАННЯ ВИМОГ ДО ПОРТАТИВНОЇ АПАРАТНО-ПРОГРАМНОЇ СИСТЕМИ.....	8
1.1 Огляд предметної області	8
1.2 Об'єкт і предмет дослідження	8
1.3 Структурні та функціональні особливості об'єкта дослідження.....	9
1.4 Аналіз існуючих методів та засобів розпізнавання блискавок	12
1.5 Огляд і характеристика датчика AS3935	16
1.6 Обґрунтування та вибір підходів до реалізації.....	18
1.7 Специфікація вимог до апаратного-програмного забезпечення.....	20
Висновок до розділу 1	22
2 МАТЕМАТИЧНЕ ТА АЛГОРИТМІЧНЕ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ СИСТЕМИ...	23
2.1 Вибір і обґрунтування методів комп'ютерної інженерії	23
2.2 Математична модель роботи сенсора AS3935	24
2.3 Алгоритм виявлення блискавки	31
2.4 Алгоритм обробки даних і виведення на OLED-дисплей	33
2.5 Алгоритм контролю живлення та енергозбереження	34
2.6 Псевдокоди основних алгоритмів	35
2.7 Узагальнена блок-схема системи	37
Висновок до розділу 2	39
3 АПАРАТНО-ПРОГРАМНЕ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ СИСТЕМИ ТА ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ	40
3.1 Загальна архітектура системи.....	40
3.2 Вибір апаратної платформи	42
3.3 Опис підключених компонентів.....	43
3.4 Вибір технологій та мови програмування	44

3.5	Вибір бібліотек та сторонніх компонентів	46
3.6	Опис програмної архітектури системи	47
3.7	Керівництво користування.....	48
3.8	Тестування системи	52
3.9	Оцінка якості розробленого АПЗ	56
	Висновок до розділу 3	58
	ВИСНОВКИ.....	60
	ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ	62
	ДОДАТОК А Код програми.....	65
	ДОДАТОК Б Матеріали апробації роботи	69
	ДОДАТОК В Блок-схема роботи алгоритму сенсора та роботи пристрою....	73

ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ

АПЗ	– апаратно-програмне забезпечення
ЗСУ	– Збройні сили України
КБР	– кваліфікаційна бакалаврська робота
ПЗ	– програмне забезпечення
AFE	– Analog Front-End
CG	– Cloud-to-Ground
GPIO	– General Purpose Input/Output
I2C	– Inter-Integrated Circuit
GPS	– Global Positioning System
INN	– Input Negative
INP	– Input Positive
OTA	– Over-the-Air
SCL	– Serial Clock Line
SDA	– Serial Data Line
SPI	– Serial Peripheral Interface
Wi-Fi	– Wireless Fidelity
WWLLN	– World Wide Lightning Location Network

ВСТУП

В умовах сучасної кліматичної ситуації, її змін та зростання екстремальних погодних явищ особливого значення набуває проблема своєчасного виявлення та попередження про насування атмосферних електричних зарядів, таких як блискавка. Блискавка є одним із найнебезпечніших явищ природи, що може створити матеріальні збитки, порушення або повне знищення роботи електронного обладнання і, звичайно, несе загрозу життю та здоров'ю людей. Також, не варто забувати про нашу ситуацію в Україні, де сміливі воїни ЗСУ боронять кордони нашої держави і їм, як не першим потрібно знати, яка погода буде супроводжувати їх. Тому, у зв'язку з вищепереліченими прикладами, зростає попит на доступні, компактні та енергоефективні пристрої для виявлення грозової активності.

Практичне значення цієї теми полягає в розробці та проектування портативного пристрою, який здатний оперативно виявляти електричні розряди в атмосфері, що в свою чергу дозволяє своєчасно вживати заходів безпеки в побуті, в сільському господарстві, на туристичних маршрутах та військових наступах тощо. Застосування спеціалізованого датчика AS3935, який дає змогу розпізнавати блискавки на основі радіочастотного аналізу, відкриває нові можливості в створенні ефективних автономних систем моніторингу грозової активності.

Мета дослідження: створити портативний детектор блискавок на основі датчика AS3935 шляхом розробки апаратно-програмної системи з можливістю автономної роботи та виведення інформації про грозову активність у доступній нам формі.

Для досягнення мети необхідно вирішити такі завдання як:

- провести огляд предметної сфери та аналіз існуючих рішень, щодо виявлення блискавок та їх технічних особливостей та мінусів використання;

- дослідити принцип роботи та характеристики датчика AS3935;
- визначити спеціальні вимоги до апаратно-програмного забезпечення, а саме виділити функціональні та нефункціональні вимоги, як система повинна функціонувати та правильно реалізовуватись;
- розробити схему апаратної частини пристрою з урахуванням вимог до портативності та енергоефективності;
- реалізувати програмне забезпечення для обробки даних із датчика AS3935 та його виведення результатів користувачу;
- протестувати пристрій в умовах, наближених до реальних, та оцінити його ефективність.

Об'єкт дослідження: процес виявлення атмосферної електричної активності.

Предмет дослідження: апаратно-програмна система на основі датчика AS3935 для розпізнавання блискавок.

Необхідність нової розробки обмеженими можливостями існуючих комерційних детекторів блискавок: більшість з них громіздких, вимагають значних енергетичних ресурсів або не забезпечують належної точності. Провідні компанії такі як Franklin Technologies, Boltek та Vaisala, пропонують професійні рішення переважно для стаціонарного або промислового використання. Натомість, у науково-технічній літературі виявлено недостатню кількість доступних рішень для побутового або польового використання.

Основним проєктним рішенням є поєднання датчика AS3935 із мікроконтролером малої потужності (наприклад, ESP32 або Arduino), що дозволяє досягти компактності, низького енергоспоживання та достатньої точності визначення блискавкової активності в радіусі до 40 км.

Результати розробки можуть бути використані в особистих портативних системах безпеки, у сфері сільського господарства для захисту відкритих об'єктів, а також у туристичних, польових, аварійно-рятувальних та тактичних заходах, де необхідне швидке реагування на грозову небезпеку.

Ця тема вже піднімалася на Всеукраїнській науково-практичній конференції «Могилянські читання – 2024»[1], де я виступав як співавтор, та було продемонстровано ідею проєкту та його мінімальна конфігурація, яка буде використана в цій роботі. Ця тема була прийнята, як актуальна тема для сучасного світу та ситуації, адже пристрій неодмінно може бути корисним воїнам на передовій так і для сільського господарства на відкритій місцевості.

1 АНАЛІЗ ІСНУЮЧИХ РІШЕНЬ У СФЕРІ РОЗПІЗНАВАННЯ БЛИСКАВОК ТА ФОРМУВАННЯ ВИМОГ ДО ПОРТАТИВНОЇ АПАРАТНО-ПРОГРАМНОЇ СИСТЕМИ

1.1 Огляд предметної області

Сучасні кліматичні зміни, зростання кількості стихійних явищ та потреба в оперативному моніторингу погоди стимулюють розвиток компактних пристроїв для виявлення атмосферних явищ. Одним із найбільш небезпечних природних явищ є блискавка. Вона може спричинити значні збитки інфраструктурі, лісовим масивам, електромережам, а також загрожувати життю людей [22].

У зв'язку з цим особливої актуальності набуває створення мобільних, автономних пристроїв, здатних визначити факт наближення грози. Для цього використовуються сенсори блискавок, такі як AS3935, які можуть виявляти електромагнітні імпульси, характерні для розрядів блискавки, а також оцінювати їхню відстань. Цей пристрій може бути використаний для верств населення, які працюють в польових умовах для попередження загрози, для систем моніторингу на віддалених територіях і також в інтеграції до розумних будинків та метеостанцій.

1.2 Об'єкт і предмет дослідження

Об'єктом дослідження є процес виявлення електромагнітної активності, спричиненої атмосферними розрядами (блискавками). Це явище має суттєве значення як у природних дослідженнях, так і в практичних сферах, пов'язаних із забезпеченням безпеки людей, об'єктів інфраструктури, а також функціонування чутливої електроніки в умовах грозової активності.

Предметом дослідження є апаратно-програмна система портативного типу для детектування блискавок, реалізована на основі датчика AS3935 [2], що забезпечує виявлення електричних розрядів у реальному часі, оцінку їх інтенсивності та відстані до джерела розряду.

Проблематика точного та своєчасного визначення блискавок має особливу актуальність в умовах зростаючої кількості екстремальних погодних явищ, пов'язаних зі змінами клімату. Відсутність доступних, надійних та простих у використанні мобільних засобів детектування блискавок є суттєвим недоліком у сфері особистої безпеки, моніторингу природного середовищу, а також для окремих технічних сфер (наприклад, сільського господарства, туризму, альпінізму, авіамоделювання та у військовій сфері).

Враховуючи компактні розміри, низьке енергоспоживання та високу чутливість датчика AS3935, дослідження можливостей його застосування для побудови портативного детектора блискавок є науково-практично доцільним і відповідає сучасним тенденціям розвитку мобільних мікроелектронних систем.

1.3 Структурні та функціональні особливості об'єкта дослідження

Блискавка – складне фізичне явище, що супроводжується викидом електромагнітного імпульсу у діапазоні від кількох кілогерц до сотень мегагерц [4]. Цей імпульс виникає внаслідок електричних розрядів між хмарами або хмарами та землею, та може бути зафіксований за допомогою спеціалізованих сенсорів. Розпізнавання блискавок дозволяє завчасно попереджати про грозову активність, забезпечувати безпеку, а також збирати метеорологічні дані.

Процес розпізнавання блискавки передбачає виявлення короткочасних електромагнітних імпульсів, відбір сигналів, які відповідають характерним ознакам природного атмосферного розряду, та подальшу обробку цих даних для індикації наближення грози. Структурно така система включає такі основні компоненти [12]:

- сенсорна частина, що містить електромагнітний приймач, спроектований для фіксації імпульсів;

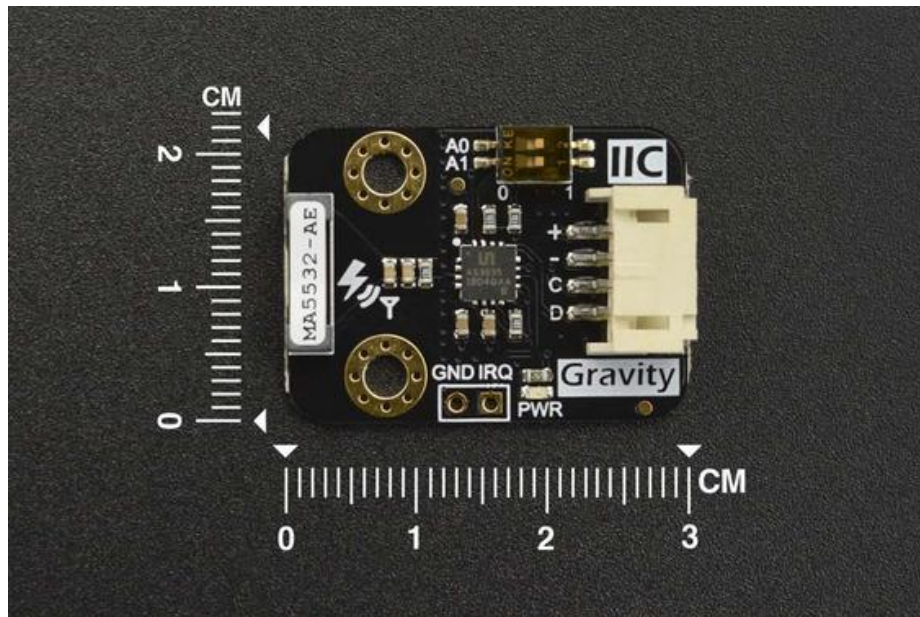


Рисунок 1.1 – AS3935 Franklin Lightning Sensor [12]

– мікроконтролер, що виконує попередню цифрову обробку сигналу, фільтрацію шумів, обчислення відстані до джерела розряду та взаємодії з іншими компонентами системи;

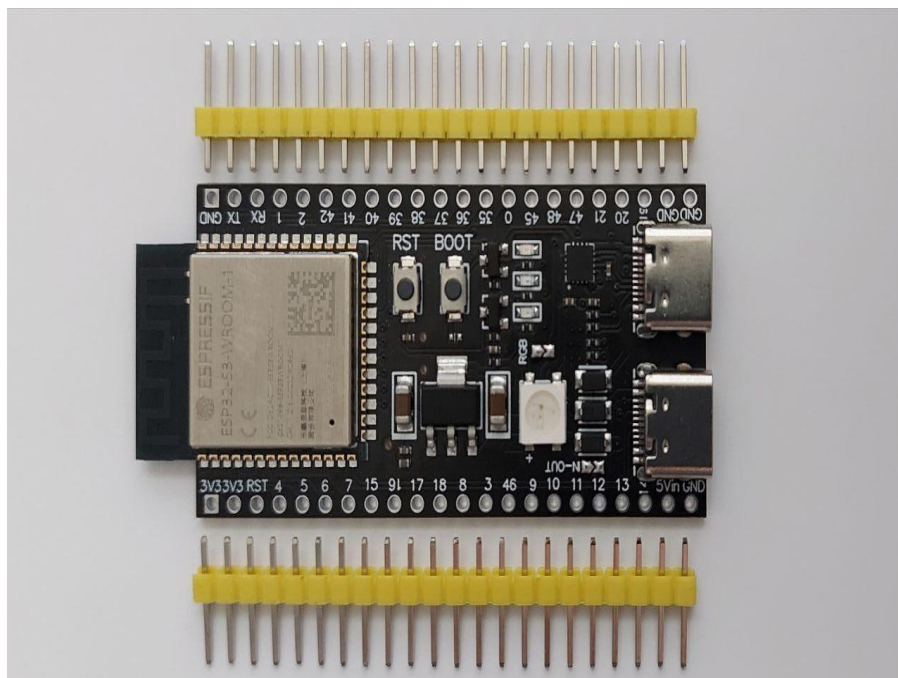


Рисунок 1.2 – Плата на основі мікроконтролера ESP32 [12]

– інтерфейс взаємодії з користувачем, за допомогою дисплею, набором світлодіодів або звуковим індикатором;

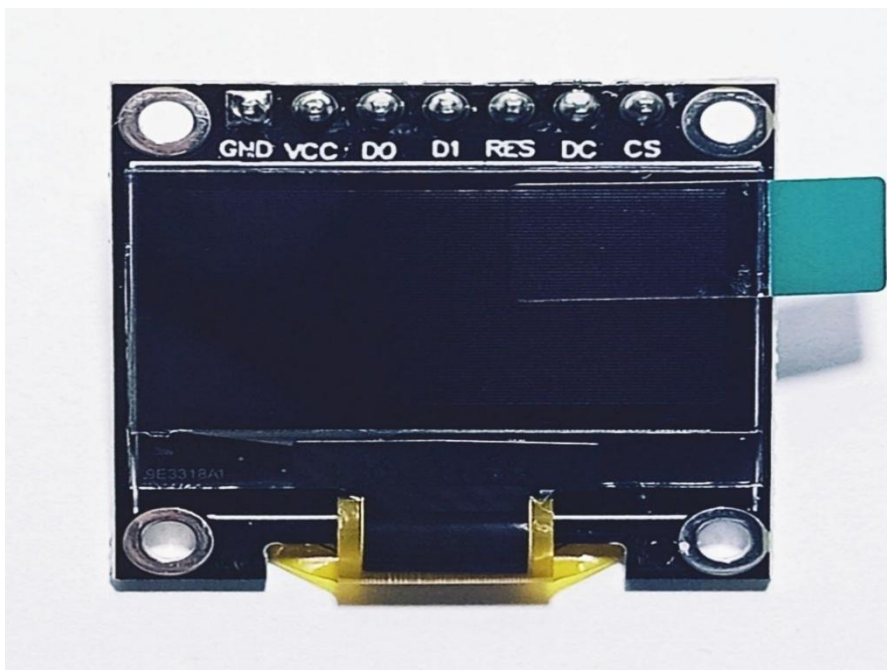


Рисунок 1.3 – OLED-дисплей SSD1306 [12]

- блок живлення у вигляді акумулятора або батарейок з можливістю оптимального енергозбереження;
- корпус та система кріплення, що забезпечує захист пристрою від впливу зовнішнього середовища та зручність у використанні;



Рисунок 1.4 – Приклад корпусу

Також, важливо враховувати, що об'єкт дослідження є динамічним – атмосферні умови постійно змінюються, тому система має працювати в широкому діапазоні та забезпечувати стабільність роботи. Оптимальне вирішення цієї задачі передбачає застосування спеціалізованих сенсорів, а також ефективну архітектуру обробки даних на рівні програмного забезпечення.

1.4 Аналіз існуючих методів та засобів розпізнавання блискавок

Система виявлення блискавок активно використовується в метеорології, авіації, енергетиці, а також у системах попередження населення про природні катастрофи. За принципом дії сучасні засоби розпізнавання можна умовно поділити на три основні підходи: радіочастотний метод, оптичний метод та GPS-кореляційний метод.

Найпопулярнішим з вищеперелічених методів є радіочастотний метод, тому що він найкраще підходить для портативних рішень, зокрема й для побутових детекторів блискавок. Блискавка створює потужний електромагнітний імпульс у діапазоні дуже низьких частот, які можуть поширюватися на великі відстані. Ці сигнали сприймаються спеціальними сенсорами та аналізуються електронікою. Гарним прикладом буде плата AS3935, сенсор з вбудованим алгоритмом і шумозахистом.

Сенсор працює у діапазоні 500 кГц, обробляє сигнали, імітує логіку визначення справжньої блискавки, оцінює відстань до неї. Перевагою такого сенсору є висока чутливість, низьке енергоспоживання та придатність для портативних систем. Але, для такого сенсору є недолік, це можливість хибного спрацювання в умовах електромагнітних шумів.

Гарним представленням, як працює сенсор буде блок-схема алгоритм роботи датчику AS3935 (рис. 1.5).

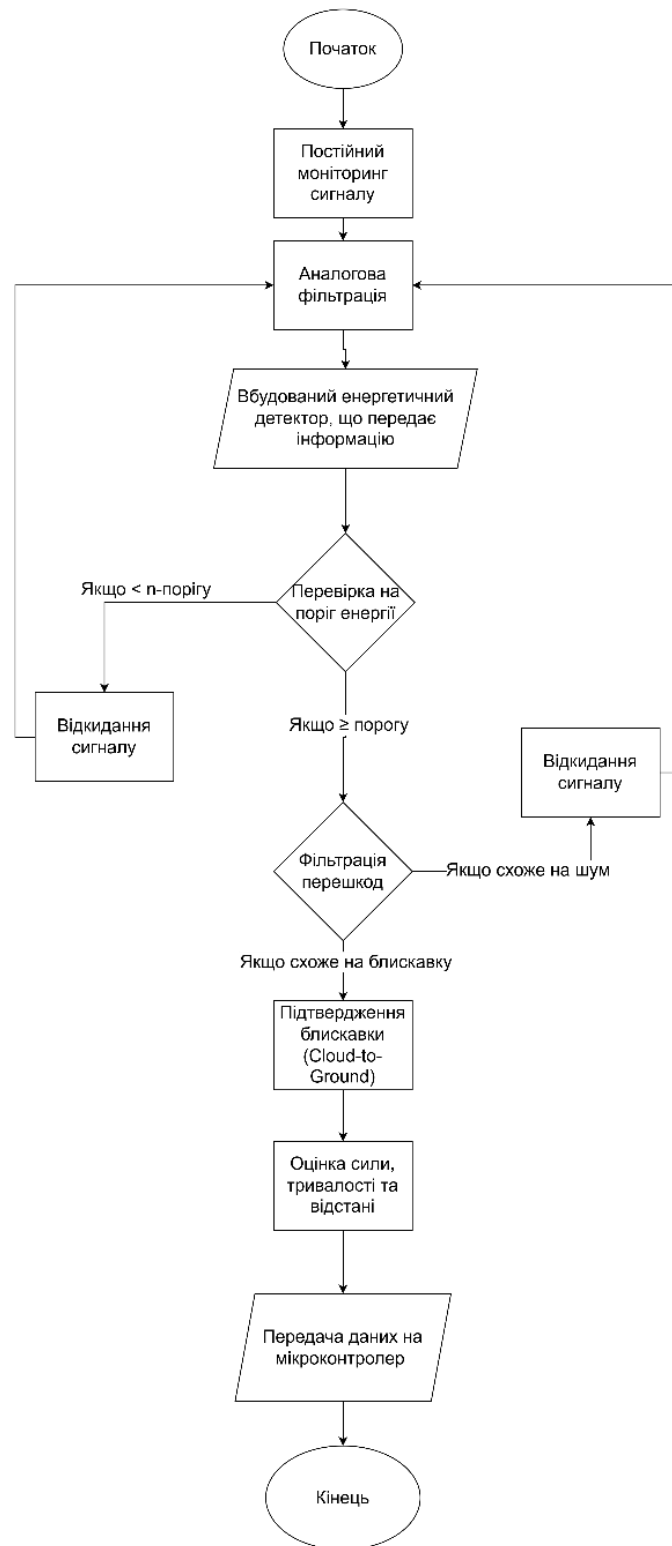


Рисунок 1.5 – Алгоритм роботи сенсора AS3935 [6]

Cloud-to-Ground – це тип грозового електричного розряду, при якому блискавка проходить між хмарою та поверхнею Землі.

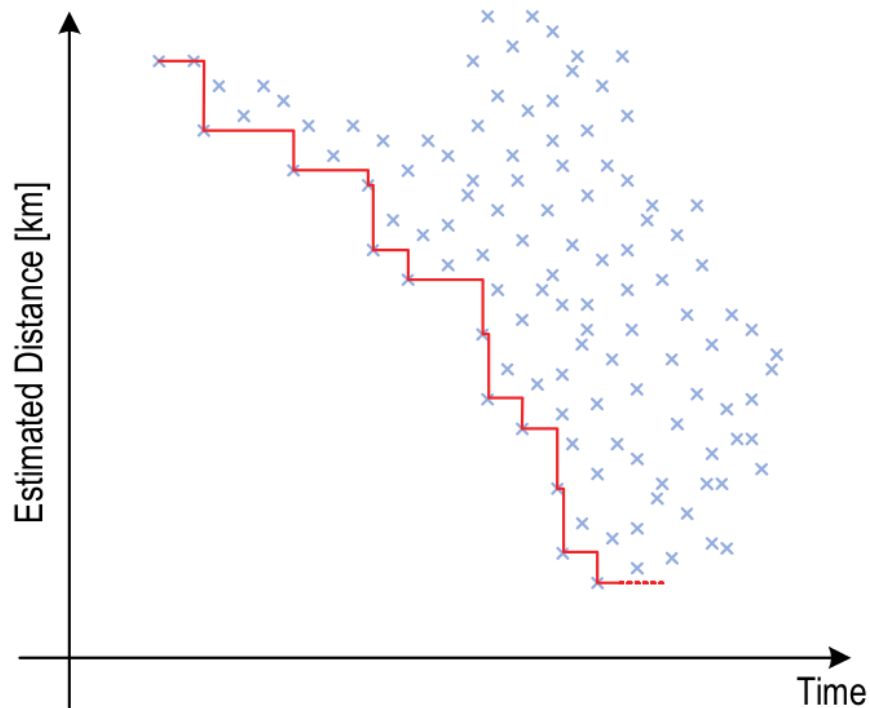


Рисунок 1.6 – Графік роботи сенсору, де $\times$ – це одиничний розряд блискавки, червона лінія – це відстань, оцінена датчиком [11]

Наступний описаний метод це оптичний. В ході оптичного метода розпізнавання блискавки відбувається за допомогою фіксації світлових імпульсів. Оптичні датчики використовують фотодіоди або фототранзистори для виявлення короткочасних спалахів. Перевага цього методу в тому, що він простий в апаратній реалізації, але залежить від погодних умов, денного світла, розряд попросту може бути не помічений в хмарах, і це є його недоліком.

І останній метод, це GPS-кореляційний метод. Застосовується в комерційних та державних системах моніторингу блискавок, наприклад LINET (Європа), WWLLN(США), Blitzortung (глобальна громадська мережа).

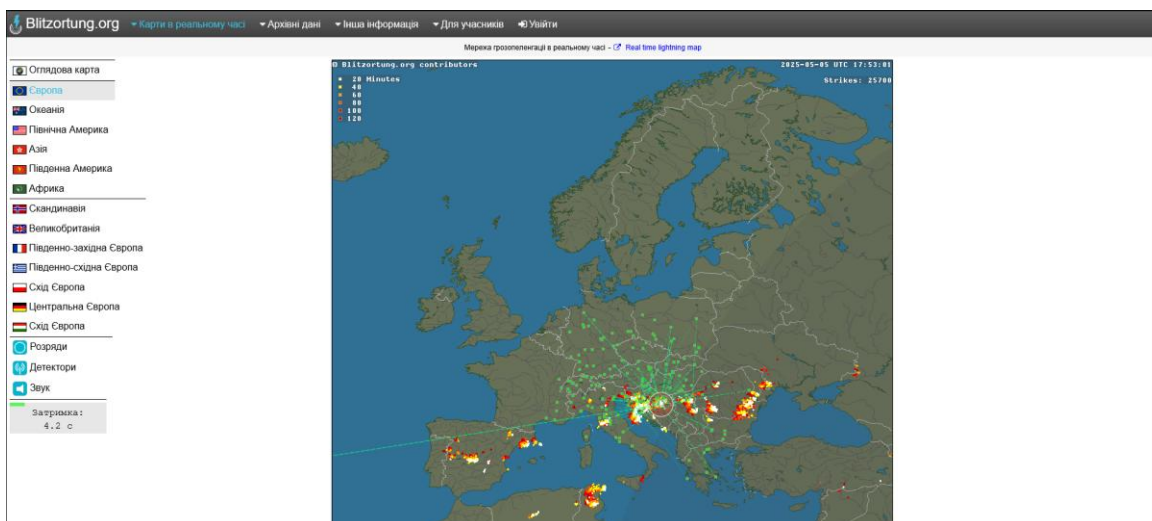


Рисунок 1.7 – Онлайн-сервіс Blitzortung,
мережа моніторингу в реальному часі [14]

Метод базується на фіксації розрядів на декількох станціях та синхронізації за часом за допомогою GPS. На основі часу прибуття сигналу розраховується координата блискавки. Перевагою такого методу це висока точність, що дає можливість формувати карти гроз у реальному часі, але реалізація доволі складна, тому й використовується у складні інфраструктурі і через свою громіздкість не дає можливості для портативного пристрою.

Таблиця 1.1 – Порівняльна таблиця основних методів

Метод	Точність	Енергоспоживання	Портативність	Стійкість до шуму
Радіо-частотний	Середня	Низьке	Висока	Середня
Оптичний	Низька	Низьке	Середня	Низька
GPS-кореляційний	Висока	Високе	Низька	Висока

Отже, з урахуванням усього вищенаведеного для проєкту підходить метод саме радіочастотний метод, адже він задовільняє потреби у точності, енергоспоживанні, портативності та стійкості до шуму. Так як наш прилад має високий рівень портативності та низький рівень енергоспоживання, це дає можливість використовувати пристрій в польових умовах, що є великою перевагою для напрямку сільського господарства та військового.

1.5 Огляд і характеристика датчика AS3935

Для створення портативного детектора блискавок було обрано спеціалізований сенсор AS3935 Franklin Lightning Sensor, розроблений компанією ams AG.



Рисунок 1.8 – Компанія ams OSRAM AG

Цей мікросхемний модуль призначений для виявлення електромагнітних імпульсів, які виникають під час атмосферних розрядів, зокрема блискавок. Він здатен виявляти грозову активність у радіусі до 40 км, що робить його ефективним компонентом для систем раннього попередження.

AS3935 має вбудований приймач, який працює на фіксованій частоті 500 кГц, а також цифрову обробку сигналів, що дозволяє відрізнити справжні блискавки від електричних перешкод, наприклад, викликаних побутовою технікою чи двигунами. Сенсор обчислює приблизну відстань до розряду блискавки, аналізуючи інтенсивність і форму сигналу. Важливою особливістю є також фільтрація псевдо-спалахів – коротких імпульсів, що не є блискавками.

Живлення сенсора підтримується в широкому діапазоні 2.4–5.5 В, що дозволяє інтегрувати його з популярними мікросхемами, такими як Arduino

або ESP32. Передавання даних здійснюється через SPI або I²C, що спрощує його підключення в різних апаратних конфігураціях.

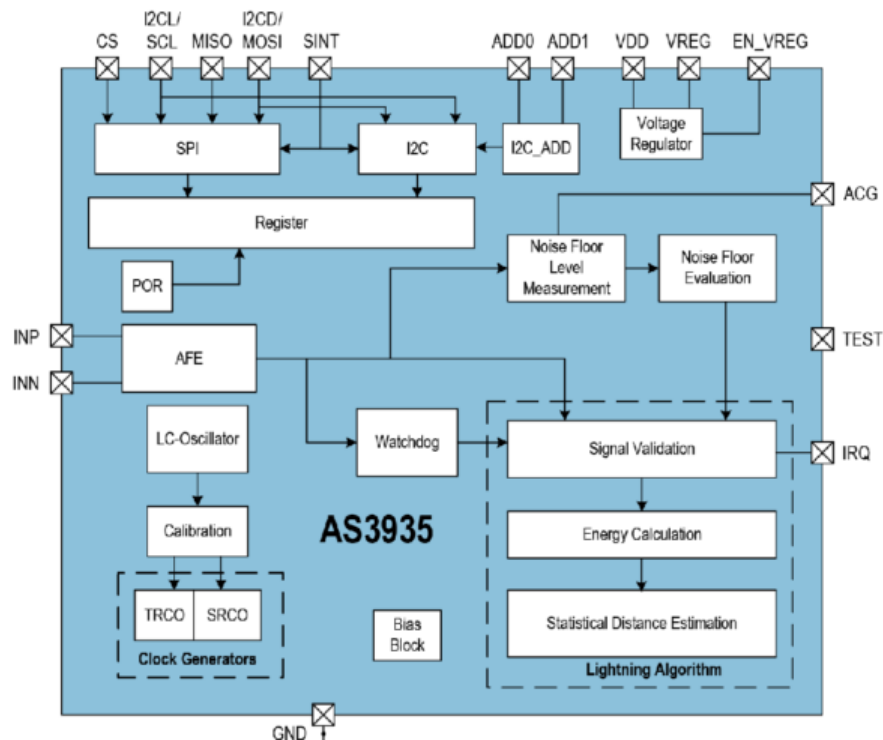


Рисунок 1.9 – Структурна блок-схема мікросхеми AS3935[11]

На рисунку 1.9 можна побачити компоненти датчика, такі як:

- SPI / I²C:цифрові інтерфейси зв'язку з мікроконтролером;
- I2C_ADD, ADD0, ADD1:адреси для I²C;
- IRQ:вивід переривання, який повідомляє мікроконтролеру про подію;
- TEST, ACG:технічні виводи для калібрування та діагностики;
- осцилятор (TRCO) і Clock Generators(SRCO) відповідають за формування опорних частот;
- калібрування (Calibration) гарантує точність роботи датчика;
- Noise Floor Evaluation та Noise Floor Level Measurement: аналіз навколишнього електромагнітного шуму, щоб уникнути хибних спрацьовувань;
- Signal Validation: перевірка, чи справді зафіксований сигнал відповідає характеристикам блискавки;

- Energy Calculation: оцінка енергії імпульсу;
- Statistical Distance Estimation: оцінка відстані до джерела розряду на основі статистичного аналізу;
- Watchdog: стежить за справністю роботи внутрішніх блоків, перезапускає їх у разі збоїв;
- Voltage Regulator / Bias Block: внутрішнє живлення та стабілізація напруги для внутрішніх модулів.

Таблиця 1.2 – Технічні характеристики

Параметр	Значення
Тип виявлення	Виявлення блискавок за електромагнітними імпульсами
Дальність виявлення, км	до 40
Частотні діапазони, кГц	500
Тип інтерфейсу	SPI або I ² C
Живлення, В	2.4–5.5
Споживання енергії в режимі очікування, мкА	~60
Можливість фільтрації перешкод	Так

Отже, сенсор AS3935 від компанії ams OSRAM AG підходить для вирішення проблеми з розпізнаванням блискавки, адже має дальність виявлення до 40 км, що забезпечує швидке попередження про небезпеку. Також має вбудовану фільтрацію перешкод, що дає можливість своєчасно та без перешкод виконувати свою функцію.

1.6 Обґрунтування та вибір підходів до реалізації

При розробці портативного детектора блискавок було поставлено мету створити компактний, автономний та енергоефективний пристрій, здатний точно виявляти грозову активність і інформувати користувача у реальному часі. Для реалізації цієї мети було вибрано вибір апаратних компонентів, відповідних програмних засобів і структури взаємодії між ними.

Для керування роботою системи обрано ESP32-S3 Development Board, яка поєднує високу продуктивність, низьке енергоспоживання та розширені

можливості бездротового зв'язку. Також ця плата має підтримку Wi-Fi та Bluetooth, що дозволяє передавати інформацію про блискавки на мобільні пристрої або у хмару. Плата ESP32-S3 має високу продуктивність, за рахунок двох ядер Xtensa LX7 із частотою до 240 МГц. Також ця плата має багато цифрових портів та підтримка глибокого сну, що спрощує підключення датчиків або дисплеїв, та забезпечує низьке енергоспоживання в автономному режимі.

Для виводу інформацію обрано дисплей SSD1306 з діагоналлю 0,96 ", який працює по інтерфейсу I²C. Цей дисплей має низьке енергоспоживання, навіть при постійному виведенні інформації. Сам екран має контрастне та чітке зображення, що дозволяє відображати символи й графіку навіть при яскравому освітленні. І при компактних розмірах дисплею пристрій буде не габаритним. На дисплеї буде виводитися інформація про виявлені розряди, рівень грозової активності, відстань до блискавки та стан акумулятора.

Система живлення передбачає використання літій-іонного акумулятора та плати керування живлення, яка буде заряджати акумулятора через USB-C. Також, акумулятор буде мати захист від перевантаження, перерозряду і короткого замикання, що забезпечить безпечне користування акумулятором.

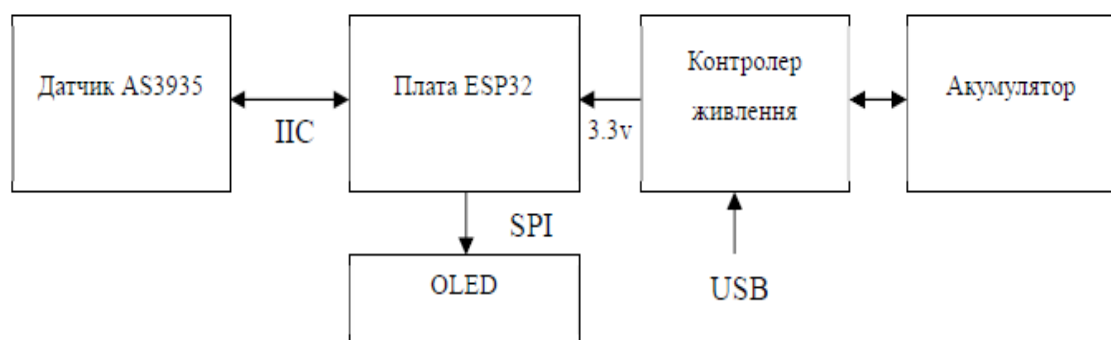


Рисунок 1.10 – Загальна схема пристрою[22]

Таким чином, вибір апаратної платформи та підхід до реалізації систем базується на портативності, енергоефективності, надійності, точністю виявлення та зручності використання. Це дозволяє використовувати пристрій як для побутового застосування, так і для професійного.

Мова для програмування плати ESP32-S3 було обрано C/C++ на платформі Arduino Core for ESP32. Він простий у використанні, дозволяє програмувати ESP32 як звичайну плату Arduino. Перевагою цієї платформи є, що в нього простий синтаксис, як у класичному Arduino, має велику кількість бібліотек, включаючи бібліотеки на сенсор AS3935 та дисплей SSD1306. Також, ця платформа добре підходить для швидкого старту, що дозволяє пришвидшити розробку. Але, ця платформа має недолік, не така гнучкість, як у іншій платформі ESP-IDF (Espressif IoT Development Framework).

1.7 Специфікація вимог до апаратного-програмного забезпечення

Функціональні вимоги описують, які задачі виконує система у відповідь на зовнішні події чи вхідні дані. Перше й найголовніше, що повинна виконувати наша система це виявлення блискавки. Система повинна автоматично виявляти імпульси блискавки за допомогою сенсора AS3935 у діапазоні частот навколо 500 кГц.

Друге – це оцінка відстані до джерела. На основі інтенсивності сигналу система має обчислювати орієнтовну відстань до блискавки (від 1 до 40 км з точністю ~ 5 км). Це дає можливість на безпечній відстані своєчасно дізнаватися про блискавку та швидко повідомляти про неї.

Третє – це виведення інформації на дисплей. Після виявлення блискавки або її наближеності на дисплей повинна відображатися відповідна інформація, а саме:

- повідомлення про факт події;
- відстань до джерела;
- кількість подій за поточну сесію;

Четверте – це ведення журналі подій. Система повинна зберігати інформацію про виявлення подій для подальшого аналізу. Зберігання може зберігатися в базу даних або в онлайн-таблицю.

П'яте – режим сну для енергозбереження. При відсутності активності система повинна переходити в енергозберігаючий режим з мінімальним споживанням енергії. Це головний пункт, адже пристрій буде використовуватись портативно, тому потрібно забезпечити максимальне енергозбереження для пристрою.

І останнє – це активація через події. Пробудження системи має відбуватися при виявленні блискавки або натисканні кнопки користувача.

Нефункціональні вимоги визначають якісні характеристики системи. Першим в нашому списку це автономність роботи. Система повинна працювати автономно при живленні від акумулятора щонайменше 12 годин у режимі моніторингу та до 24 годин у режимі очікування.

Друге – це час реакції на подію. Затримка між виявленням імпульсу блискавки та відображенням інформації на екрані не повинна перевищувати 1 секунди.

Третє – це мобільність та захист корпусу. Усі компоненти повинні бути змонтовані в компактному корпусі з можливістю переносити пристрій. Захист має відповідати рівню приблизному IP54 для використання на відкритому повітрі.

Четверте – це температурний режим роботи. Пристрій повинен зберігати працездатність у діапазоні температур від -10°C до $+50^{\circ}\text{C}$. Це забезпечить роботу пристрою в умовах низьких або високих температур.

І останнє – це енергоефективність. Система повинна використовувати можливості ESP32 для управління живленням компонентів.

Отже, було сформовано повну специфікацію функціональних та нефункціональних вимог до АПЗ системи виявлення блискавок. На основі обраних компонентів, визначено основні задачі, очікувана поведінка та вимоги надійності. Чітко сформовані вимоги є основою для подальшого проєктування, розробки та тестування АПЗ.

Висновок до розділу 1

У результаті проведеного аналізу предметної області було визначено, що сучасні системи моніторингу атмосферних явищ відіграють критично важливу роль у прогнозуванні небезпечних метеоявищ та підвищенні рівня безпеки. Було з'ясовано, що для побудови компактної, автономної системи виявлення блискавок доцільно використовувати спеціалізовані мікросхеми, зокрема сенсор AS3935, який має високий рівень чутливості та алгоритми перевірки електромагнітних імпульсів, характерних для грози.

В межах огляду існуючих рішень було розглянуто як промислові, так і аматорські системи виявлення атмосферної активності. З'ясовано, що багато з них використовують Arduino-сумісні плати, сенсори AS3935 та прості інтерфейси зв'язку.

Аналіз апаратних компонентів дозволив обґрунтувати вибір ESP32-S3 Development Board як основної керуючої плати. Вона забезпечує потужність, підтримку Wi-Fi та Bluetooth, а також широкі можливості розширення. Також обрано OLED-дисплей SSD1306 для локального виводу інформації, сенсор AS3935 для виявлення блискавки та передбачено використання акумулятора з платою керування живлення для автономної роботи.

Розглянуто інтерфейси взаємодії між компонентами, зокрема I²C і SPI, які використовуються для комунікації між ESP32 та периферійними пристроями. Визначено оптимальну конфігурацію підключення для забезпечення стабільної передачі між контролером, сенсором та дисплеєм. Також, було розглянуто мову програмування, що буде використовуватись для розробки прошивки пристрою. Оскільки ESP32 підтримує C/C++, саме ці мови обрано як основні завдяки своїй ефективності, гнучкості, великій кількості бібліотек та активній спільноті розробників.

2 МАТЕМАТИЧНЕ ТА АЛГОРИТМІЧНЕ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ СИСТЕМИ

2.1 Вибір і обґрунтування методів комп'ютерної інженерії

Розробка системи виявлення блискавки потребує використання методів комп'ютерної інженерії, які забезпечують ефективну інтеграцію апаратних та програмних компонентів. Обрана система, як і було описано в попередньому розділі, реалізується на базі мікроконтролера ESP32-S3, сенсора електромагнітних імпульсів AS3935, OLED-дисплея SSD1306, акумуляторної батареї та плати керування живлення. Така конфігурація дозволяє створити автономну систему моніторингу атмосферних явищ із низьким енергоспоживанням.

Мікроконтролер ESP32-S3 був обраний як головний обчислювальний вузол через наступні переваги: має високу обчислювальну здатність, завдяки двоядерному процесору Tensilica LX7 (до 240 МГц), має вбудовані інтерфейси SPI та I2C, що необхідні для підключення сенсора та дисплея, має підтримку енергозберігаючих режимів, це є важливим аспектом для автономних пристроїв, має великий обсяг оперативної пам'яті (до 512 КБ SRAM) для буферизації даних та виконання алгоритмів фільтрації та має можливість оновлення прошивки по повітрю (OTA), корисна для модернізації систем без фізичного доступу до пристрою, що дозволяє зменшити витрати часу на обслуговування та забезпечити масштабованість рішення.

Сенсор AS3935 генерує переривання при виявленні електромагнітного імпульсу, що характерний для блискавки. За допомогою I2C (або SPI) ESP32 отримує дані про силу сигналу, його енергію та оцінювану відстань до джерела. Для надійної обробки подій застосовується метод програмної фільтрації шумів та внутрішній алгоритм валідації сигналу, який виконується на самому сенсорі.

Інформація про спрацювання сенсора виводиться на OLED-дисплей SSD1306, який підключається через I2C. На дисплеї будуть відображатись ідентифікатор подій, потужність сигналу та відстань до джерела.

Розробка інтерфейсу виводу інформації буде ґрунтуватися на методах структурного програмування на C/C++, з використанням бібліотек для ESP-IDF або Arduino. Також, не варто забувати, що в умовах автономної роботи пристрою важливо забезпечити ефективне керування живленням. Після обробки події ESP32 переходить у режим сну. Пробудження здійснюється через переривання від сенсора AS3935. Для цього використовується програмний контроль живлення сенсора та дисплея, режими Low Power Mode мікроконтролером та менеджер живлення для стабілізації напруги і заряду акумулятора. Крім того, застосовується періодичне вимірювання стану батареї з виведенням її рівня на дисплей, що дозволяє користувачеві вчасно заряджати пристрій.

Отже, методи комп'ютерної інженерії, які використовуються у проєкті, забезпечують гнучкість, масштабованість та енергоефективність системи. Їх застосування дозволяє реалізувати надійний для виявлення блискавки з простим візуальним інтерфейсом та можливістю тривалої роботи.

2.2 Математична модель роботи сенсора AS3935

Сенсор AS3935 – це мікросхема виявлення блискавок, яка здатна визначити, чи є імпульс результатом реального атмосферного розряду, оцінювати його енергію та приблизну відстань до джерела. Для моделювання роботи датчика можна умовно розділити процес на кілька етапів, кожен з яких має свою математичну основу, такі як: виявлення електромагнітного імпульсу, валідація сигналу, розрахунок енергії імпульсу, оцінка відстані до джерела блискавки та оцінка рівня шуму.

2.2.1 Виявлення електромагнітного імпульсу

Виявлення електромагнітного імпульсу, цей етап є першою фазою роботи датчика і має вирішальне значення для коректного розпізнавання блискавки. Сенсор постійно аналізує вхідний сигнал з антени на наявність імпульсів, характерних для електромагнітного розряду в атмосфері. Прийом і аналіз сигналу здійснюється у кілька етапів, включаючи підсилення, фільтрацію, порогову обробку та активацію внутрішнього осцилятора.

Електромагнітні хвилі приймаються антеною, підключеною до диференціального входу INP/INN (рис 2.1).

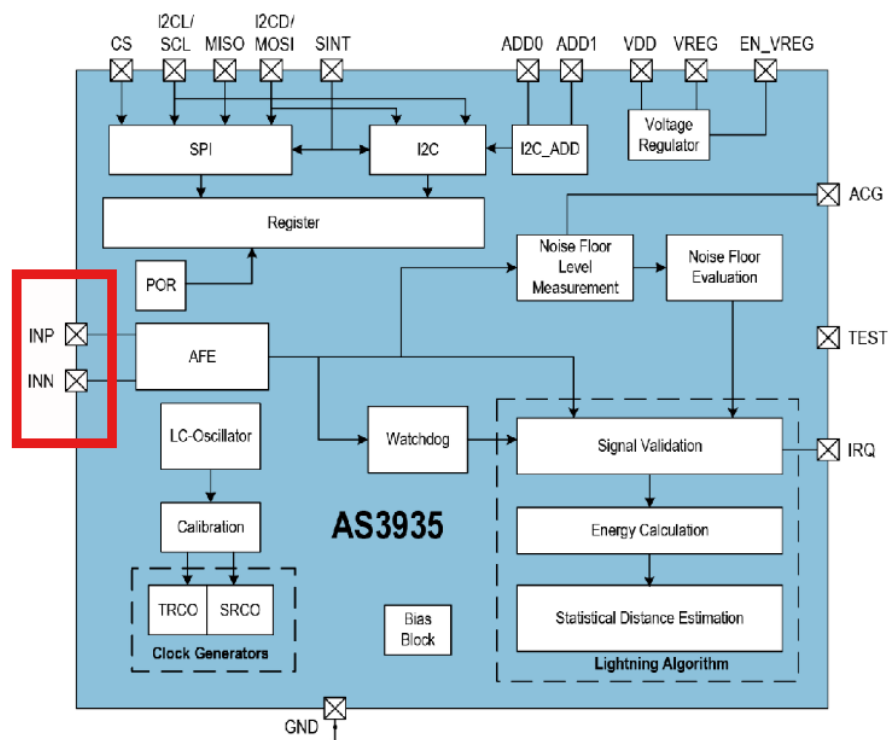


Рисунок 2.1 – Диференціальний вхід INP/INN [11]

Отриманий сигнал можна записати так:

$$V_{in}(t) = A \times \sin(2\pi ft + \phi), \quad (2.1)$$

де A – амплітуда сигналу;

$f \sim 500\text{кГц}$ – частота розряду блискавки;

ϕ – початкова фаза.

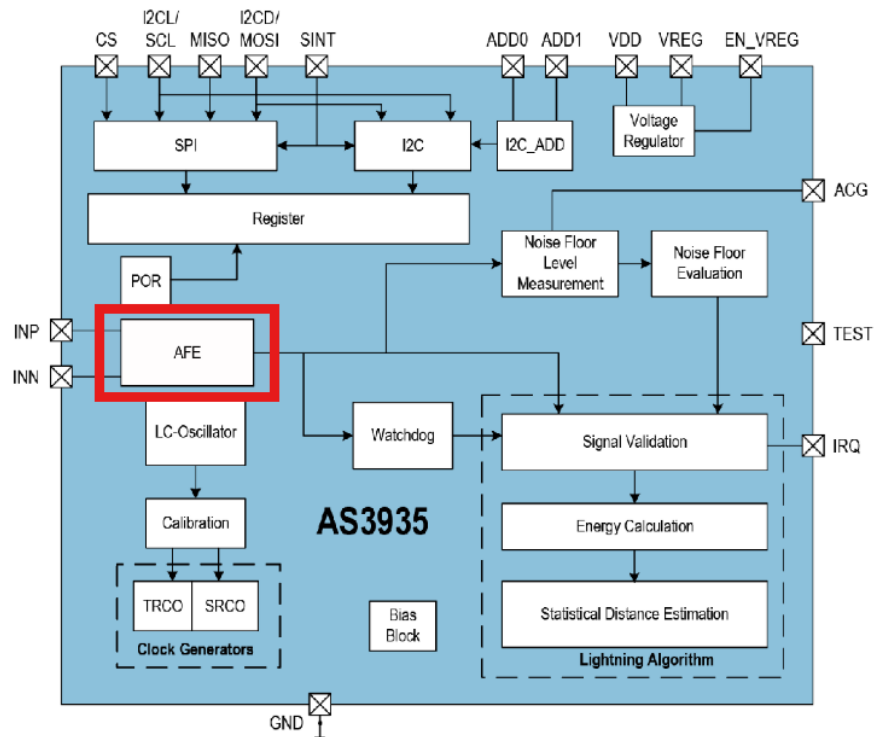


Рисунок 2.2 – Аналоговий інтерфейсу (AFE) [11]

Аналоговий інтерфейс виконує наступні функції:

Підсилення сигналу, де слабкий сигнал з антени підсилюється до рівня, придатного для подальшої обробки.[6]

$$V_{amp}(t) = G \times V_{in}(t), \quad (2.2)$$

де G – коефіцієнт підсилення.

Смугову фільтрацію: сигнал проходить через фільтр із передавальною функцією $H(f)$, яка пропускає тільки частоти поблизу 500 кГц:

$$V_{filtered}(t) = F^{-1}[H(f) \times F\{V_{amp}(t)\}], \quad (2.3)$$

Аналого-цифрове перетворення: після обробки сигнал переходить у цифрову форму, а бо у вигляді логічного рівня (High/Low), якщо він перевищив певний поріг.[6]

Якщо:

$$|V_{filtered}(t)| \geq V_{th}, \quad (2.4)$$

тоді сигнал передається на наступні етапи обробки.

Далі в процесі виявлення імпульсу йде порогове виявлення, поріг V_{th} визначає мінімальну амплітуду сигналу, яку вважають достовірною для аналізу. Він здається програмно у вигляді регістру чутливості:

$$V_{th} = V_{ref} \times S, \quad (2.5)$$

де $S \in [1,16]$ – програмно встановлюваний рівень чутливості;

V_{ref} – внутрішня референсна напруга.

Формула вище, означає що порогове значення напруги для виявлення блискавки або іншого імпульсного сигналу визначається відносно опорного рівня V_{ref} помноженого на коефіцієнт чутливості S . Далі, якщо $|V_{filtered}(t)| > V_{th}$, то активується LC-осцилятор і запускається валідація. Це дозволяє уникати помилкових спрацювань від фонових електричних перешкод.[4]

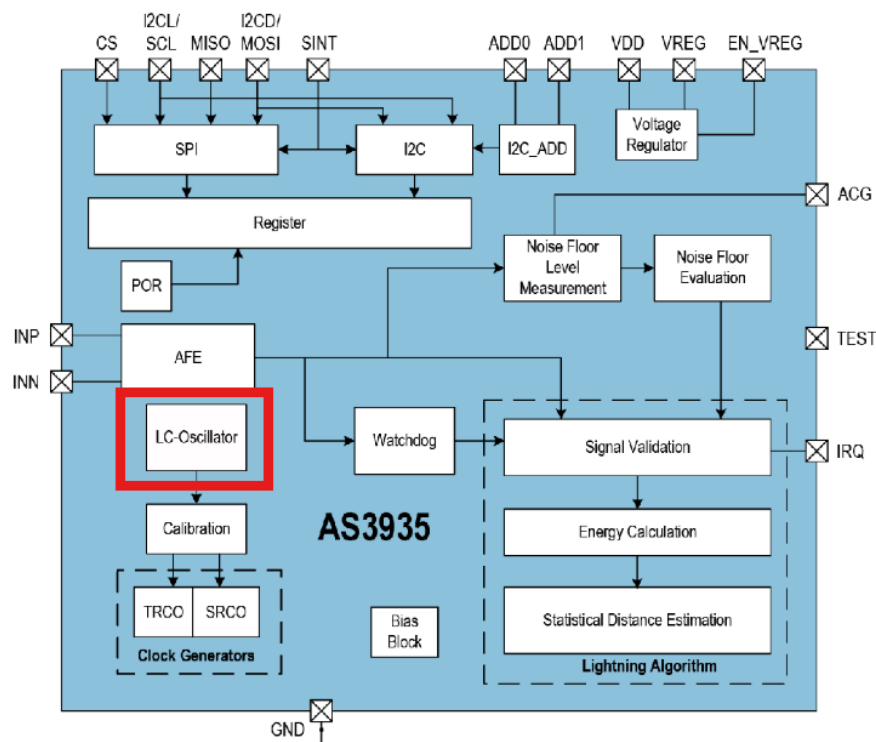


Рисунок 2.3 – Місцезнаходження LC-осцилятора[11]

Взаємодія з LC-осцилятором відбувається наступним чином, якщо вхідний сигнал підходить по умові $|V_{filtered}(t)| > V_{th}$, то активується осцилятор, який в свою чергу починає резонанс із частотою:

$$f_{LC} = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}, \quad (2.6)$$

де f_{LC} – резонансна частота коливального контуру, яка визначає частоту, на якій контур найкраще проводить коливання;

L – індуктивність в контурі;

C – ємність в контурі.

Це формула резонансної частоти ідеального коливального LC-контуру – електричного кола, яка складається з індуктивності та конденсатора. Ці такому контурі енергія коливається між електричним полем (в конденсаторі) та магнітним полем (в котушці індуктивності). f_{LC} – це частота, на якій ця передача енергії відбувається найефективніше – без втрат в ідеальному випадку.[9]

Нам, як користувачам цієї системи що описана вище, надається можливість налаштовувати чутливість. Зміна параметрів чутливості впливає на виявлення імпульсів. У випадку підвищення чутливості, зростає ризик помилкових спрацювань, підвищується кількість спроб виявлення імпульсів та знижує порогове значення напруги (V_{th}).

Отже, підсумовуючи вищеописане, виявлення імпульсу є першим кроком у повному алгоритмі розпізнавання блискавки. Якщо на цьому етапі сигнал не проходить поріг – система ігнорує його. Правильне налаштування порогу і фільтрації є критичним для розпізнавання блискавки, оскільки воно впливає на точність, надійність та швидкодію пристрою.

2.2.2 Валідація сигналу та розрахунок енергії: математичне обґрунтування

Валідація сигналу – це процес перевірки, чи електромагнітний імпульс, що був виявлений датчиком, дійсно є блискавкою, а не перешкодою або електричним шумом. Це досягається аналізом частоти сигналу, амплітуди енергії, тривалості та статистичних характеристик. Блискавка створює короткі потужні імпульси у діапазоні 500 кГц (+/- 15 кГц). Щоб виділити їх із шуму,

використовується LC-осцилятор, який фільтрує імпульс та налаштований на частоту f_{LC} . Після фільтрації сигнал посилюється в аналоговому фронт-енді(AFE) . Визначається амплітуда імпульсу V_{in} і порівнюється з пороговим значенням V_{th} (формула 5). Якщо $V_{in} > V_{th}$, сигнал вважається потенційно валідним.

Енергію сигналу обчислюється наступним чином:

$$E = \int_0^T V_{in}^2(t) dt \quad (2.7)$$

або в дискретному вигляді:

$$E = \sum_{i=1}^n V_i^2 \times \Delta t, \quad (2.8)$$

де V_i – амплітуда вибірок сигналу;

Δt – час між вибірками;

T – загальна тривалість сигналу.

Це формула для обчислення енергії сигналу у часі. Інтегрування цієї формули потрібне, адже ми накопичуємо всю енергію, яку несе сигнал протягом усього часу його існування. Ця формула дає можливість розрахувати енергію сигналу, а це в свою чергу дає можливість оцінити силу блискавки, відфільтрувати слабкі або шумові сигнали, які не мають достатньої енергії та оцінити відстань до джерела, адже сильніші сигнали зазвичай ближчі.

Далі, на основі значення енергії (E), сенсор оцінює відстань за допомогою емпірично підібраної формули, яка враховує ослаблення сигналу згідно з відомими законам радіофізики. Загальна модель для оцінки відстані має такий вигляд :

$$d = \sqrt{\frac{K}{E}} \quad (2.9)$$

де d – оцінена відстань до джерела блискавки;

E – розрахована енергія імпульсу;

K – емпіричний коефіцієнт, який враховує тим антени, чутливість приймача, загасання сигналу тощо.

Завдяки такому підходу, датчик AS3935 може визначати орієнтовну відстань до джерела блискавки в межах до 40 км з кроком до 1 км.

Оцінка шуму – це етап фільтрації сигналу, що надходить на сенсор. Головна мета цього механізму – визначати поточний фон електромагнітного шуму в середовищі, в якому працює пристрій. Високий рівень фонових електромагнітних шумів може призводити до хибних спрацювань сенсору. Щоб уникнути цього, сенсор постійно оцінює рівень шуму в середовищі. Розрахунок шуму базується на середньому квадратичному значенні напруги шуму, яке обчислюється наступним чином:

$$N_{avg} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n V_{noise}^2(i), \quad (2.10)$$

де N_{avg} – середній рівень шуму;

n – кількість вимірювань (від 16 до 128 залежно від налаштувань);

$V_{noise}^2(i)$ – значення шумової напруги при i -му вимірюванні.

Цей показник дозволяє мікросхемі визначити так званий «Noise Floor» – мінімальний рівень сигналу, нижче якого електромагнітні коливання вважаються завадою, а не блискавкою. Після обчислювання N_{avg} , мікросхема коригує порогову напругу, за якою фільтрується вхідні сигнали. Таким чином, сенсор адаптивно змінює свою чутливість до сигналів у залежності від умов навколишнього середовища.

Підбиваючи підсумки, було визначено умови валідації сигналу, важливо, щоб всі умови виконувались одночасно:

- 1) $f_{signal} \sim 500\text{кГц}$ – сигнал вважається потенційною блискавкою, якщо його частота лежить у межах характерного діапазону;
- 2) $V_{in} > V_{th}$ – блискавка має характерну тривалість сигналу, якщо імпульс короткий або довгий – він не проходить перевірку;
- 3) $E > E_{min}$ – оцінюється загальна енергія сигнал. Надто слабкий або, навпаки, аномально сильний імпульс може бути шумом або іншим джерелом;

4) $E \gg N_{avg}$ – сигнал порівнюється з набором шаблонів, характерних для справжніх атмосферних розрядів. Якщо його форма та характеристики відповідають цим шаблонам – вважається дійсним.

2.3 Алгоритм виявлення блискавки

В цьому підрозділі розберемо, як працює алгоритм виявлення блискавки, який був показаний раніше (рис. 1.5).

У початковому стані система пристрою подає живлення на мікросхему AS3935. Встановлюються початкові налаштування так як: I2C/SPI інтерфейси, рівень шуму, пороги, тип блискавки тощо. Далі вмикається внутрішній генератор частот. Цей крок необхідний, адже забезпечує підготовку пристрою до подальшого активного моніторингу.

Постійний моніторинг сигналу на датчику AS3935 відбувається шляхом неперервного прослуховування навколишнього електромагнітного фону у діапазоні 500 кГц. Сигнал приймається через антену або індуктивний вхід. Далі вхідні дані передаються до аналогового інтерфейсу.

Після передачі вхідних даних починається аналогова фільтрація. На цьому етапі сигнал проходить через аналогові фільтри. Видаляються високочастотні та низькочастотні шумові сигнали, залишаються тільки ті, що відповідають шаблонам блискавки. Сама фільтрація відбувається LC-осцилятором і калібруванням.

Після аналогової фільтрації відбуваються перевірки порогу енергії та енергії імпульсу. За допомогою перевірок буде вирішено, чи дійде сигнал до кінця. Спеціальний блок у мікросхемі оцінює енергію імпульсу на основі амплітуди та тривалості сигналу. Якщо енергія замала – сигнал відкидається й ігнорується в подальшому. Якщо енергія велика – підлягає для аналізу далі. Перевірка порогу енергії відбувається за заданим порогом, який вираховується за формулою вищеописаною (формула 5). Якщо зафіксована енергія нижча за заданий поріг, то ймовірно це шум або перешкода. Такий сигнал відкидається й ігнорується. Інакше, енергія вища за поріг, сигнал передається на фільтрацію

перешкод і далі визначається відповідність електромагнітного збурення типовим ознакам блискавки.

Після аналізу схожості на блискавку відбувається підтвердження блискавки, мікросхема визначає тип блискавки, а саме CG (Cloud-to-Ground), бо саме така блискавка є найбільш небезпечною, адже напрямок блискавки спрямований від хмари до землі. Після підтвердження виконується статистичне оцінювання, а саме сила імпульсу, тривалість та орієнтовна відстань.[15]

Передача вихідних даних виконується на мікроконтролер, усі оброблені дані передаються через інтерфейс I2C або SPI, остаточні дані виводяться на OLED-дисплей і можуть бути збережені на хмарне сховище для подальшого аналізу.

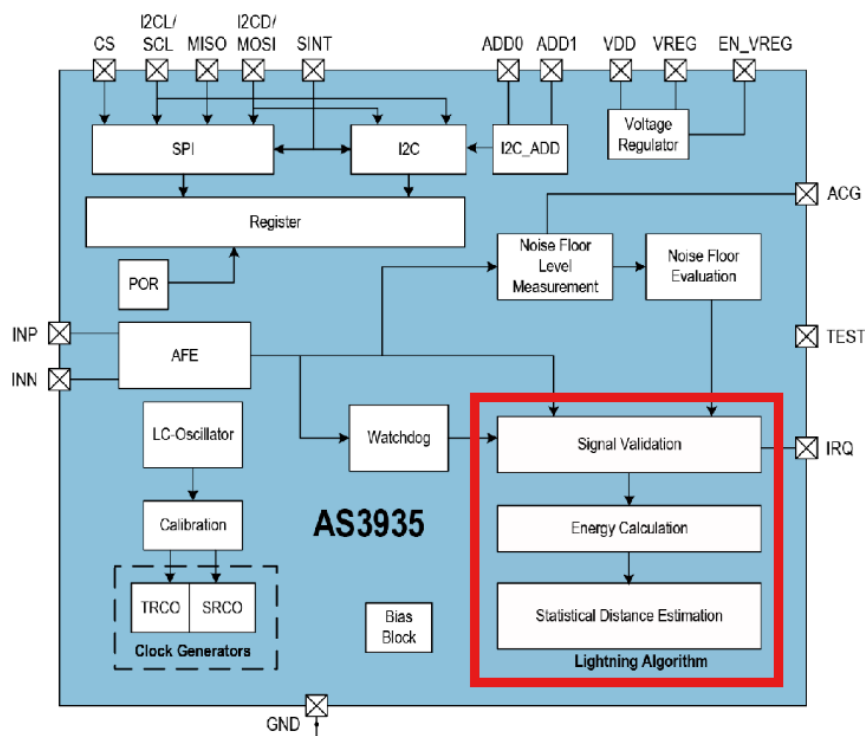


Рисунок 2.4 – Блок компонентів на мікросхемі[11]

Таким чином, кожен етап обробки сигналу в мікросхемі виконує важливу функцію у процесі достовірного виявлення блискавок. Завдяки поетапному відсіюванню шумів, перевірці параметрів імпульсу та виявленню відповідності шаблонам природних електромагнітних явищ, пристрій

забезпечує високу точність і мінімізацію хибних спрацювань. Такий багаторівневий підхід до обробки сигналів дозволяє ефективно використовувати мікросхему в умовах з підвищеним рівнем радіоперешкод і змінних погодних факторів. Алгоритм у своїй основі поєднує апаратну надійність із розумною логікою реагування на потенційно небезпечні явища, що робить його особливо актуальним для систем попередження та моніторингу атмосферної активності.

Отже, алгоритм виявлення блискавки, реалізований у мікросхемі AS3935, є високоефективним поєднанням апаратної фільтрації, цифрової обробки сигналів та статистичного аналізу. Він забезпечує надійне виявлення електромагнітних імпульсів, характерних для атмосферних розрядів, шляхом багатокрокової перевірки сигналу: від початкової енергетичної оцінки до підтвердження справжності імпульсу як блискавки.

2.4 Алгоритм обробки даних і виведення на OLED-дисплей

Алгоритм роботи пристрою полягає в опрацюванні сигналів від цифрового датчика атмосферних розрядів (блискавок) та поданні результатів користувачеві через графічний дисплей. Початкова ініціалізація відбувається наступним чином: ініціалізується дисплей та виводиться стартове повідомлення про запуск, встановлюється з'єднання з цифровим датчиком, перевіряється його наявність, налаштовується режим роботи датчика (працює він в приміщенні чи надворі), програмується цифровий вхід мікроконтролера для реагування на події з боку датчика через переривання. Далі датчик сигналізує про подію (блискавку, перешкоду або шум) через спеціальний вивід, з'єднання із мікроконтролером. У момент активації цього виводу спрацьовує механізм обробки переривань, який встановлює відповідний прапорець у програмі. У головному циклі роботи пристрою постійно перевіряється, чи була подія. Якщо подія відбулася, то зчитується тип зафіксованої події, шум, перешкода чи блискавка. Якщо зафіксовано блискавку – додатково визначається її приблизна відстань. Формується

повідомлення для користувача. Наприклад, «виявлено блискавку», «виявлено перешкоду», «виявлено шум».

Останнім етапом йде виведення інформації. Дані, які були визначенні на попередніх етапах виводяться на графічний дисплей. Перед цим дисплей очищується, після чого відображається нове повідомлення про подію. Такий підхід забезпечує зручне інформування користувача про зміну атмосферних умов.

2.5 Алгоритм контролю живлення та енергозбереження

У процесі роботи пристрою реалізовано базові заходи енергозбереження, які дозволяють споживання електроенергії у режимі очікування події.

Мікроконтролер постійно перебуває у стані активності, проте інтенсивна обробка даних та оновлення OLED-дисплея відбувається лише в момент надходження переривання від датчика грози. Таким чином, основна частина часу мікроконтролер знаходиться в очікуванні події, а не в активному циклі опитування пристроїв, що дозволяє мінімізувати споживання ресурсів.

Датчик постійно виконує аналіз електромагнітної обстановки, і у разі виявлення грози, шуму або перешкоди виводить логічний сигнал на спеціальний вивід переривання. Це дозволяє уникнути постійного опитування стану датчика та забезпечує ефективне використання обчислювальних ресурсів мікроконтролера.

OLED-дисплей активується лише при появі події. У звичайному стані дисплей не оновлюється, що дозволяє уникати зайвого енергоспоживання. Крім того, реалізована функція ручного вимкнення дисплея – за допомогою натискання кнопки «BOOT» на мікроконтролері користувач може вимкнути пристрій, коли перевірка атмосферних змін не потрібна. Це особливо корисно при автономному живленні, дозволяючи суттєво зменшити енергоспоживання пристрою.

Окрім ручного вимкнення, така кнопка може бути застосована і для ввімкнення режиму зменшеного енергоспоживання без повного вимкнення системи. Це відкриває можливості для створення адаптивної логіки: наприклад, у нічний час пристрій може автоматично переходити в пасивний режим, коли дисплей повністю вимикається, а мікроконтролер працює в режимі light sleep і лише реагує на переривання від датчика.

Додатковим кроком до покращення енергозбереження може стати інтеграція систем керування живленням на основі таймера або часових інтервалів активності. Це дає змогу виконувати періодичне пробудження систем для аналізу даних та переходу назад у режим сну, що особливо актуально в умовах живлення від акумулятора або сонячної панелі.

Таким чином, реалізований підхід до енергозбереження не лише знижує навантаження на джерело живлення, а й продовжує час автономної роботи пристрою, забезпечує водночас ефективний моніторинг атмосферних явищ без втрати інформації та функціональності.

2.6 Псевдокоди основних алгоритмів

У цьому підрозділі наведено узагальнене представлення логіки роботи системи у вигляді псевдокодів, що відображають основні етапи роботи програмного забезпечення в нашому пристрої. Псевдокод дозволяє абстрагуватися від конкретної мови програмування, зосередившись на загальному алгоритмічному підході до реалізації задачі. Такий формат подання є зручним як для аналізу, так і для подальшої реалізації на різних апаратних чи програмних платформах.

Структура програми складається з кількох ключових етапів: ініціалізації, основного циклу подій, реагування на переривання від датчика блискавки, а також взаємодії з користувачем через елементи керування. Кожен із цих етапів реалізовано у вигляді завершених блоків, які забезпечують стабільну роботу та коректу реакцію на зовнішні умови. Нижче наведено узагальнені блоки псевдокоду, що відображають основні алгоритмічні етапи.

ПОЧАТОК

Ініціалізувати шину I2C для обміну даними

Якщо дисплей не знайдено:

Вивести повідомлення про помилку

Якщо датчик не відповідає:

Вивести повідомлення про помилку

Зупинити виконання програми

Налаштувати пін переривання як вхід

Призначити функцію обробки переривань

Вивести на дисплей повідомлення «Система готова»

КІНЕЦЬ

ЦИКЛ безкінечно

Якщо спрацювало переривання від сенсору:

Скинути прапорець переривання

Отримати тип події (шум, перешкода чи блискавка)

Очистити дисплей

Якщо подія – шум:

Вивести «Виявлено шум»

Інакше якщо подія – перешкода:

Вивести «Виявлено перешкоду»

Інакше якщо подія – блискавка:

Вивести «Виявлено блискавку»

Зчитати та вивести відстань до джерела

Інакше:

Вивести «Невідома подія»

Оновити дисплей

Затримка 50мс (для уникнення надлишкових обчислень)

КІНЕЦЬ ЦИКЛУ

Якщо натиснуто кнопку BOOT:

Вимкнути пристрій

Затримка для стабілізації натискання

2025 p.

функцій чи бібліотек. Це дає змогу легко адаптувати логіку роботи пристрою під інші платформи або додаткові сенсори у майбутньому.

2.7 Узагальнена блок-схема системи

Розробка мікроконтролерної системи будь-якого рівня складності потребує чіткого розуміння загальної структури взаємодії її основних компонентів. Для цього доцільно застосувати метод узагальненої блок-схеми, яка дозволить візуально представити логіку функціонування пристрою, основні етапи обробки даних та взаємодії між програмною і апаратною частинами системи.

Узагальнена блок-схема системи, що була реалізована в межах цього проєкту, є структурною моделлю, яка описує послідовність виконання дій мікроконтролером, взаємодію з периферійними пристроями, а також з користувачем через кнопку керування. Така схема дозволяє виділити основні функціональні блоки пристрою, їхній взаємозв'язок та інформаційні потоки між ними.

На блок-схемі (рис. 2.5) можна умовно виділити кілька ключових підсистем:

1) підсистема живлення – відповідає за подачу стабільного електричного струму до всіх компонентів системи. Хоча вона не є програмно-керованою частиною, її стабільність є критично для коректної роботи пристрою;

2) центральним обчислювальний модуль (ESP32) – основа пристрою. Саме мікроконтролер ініціалізує периферію, здійснює обробку сигналів, інтерпретує інформацію від сенсора та виводить результати користувачеві. Його функції розбиті на обробку переривань, виконання логіки програми, управління відображенням на дисплеї, контроль стану кнопок;

3) датчика блискавки AS3935 – периферійний модуль, що виконує функцію детектування електромагнітних імпульсів, характерних для атмосферних розрядів. Він безпосередньо підключений до ESP32 через шину

I2C та надсилає сигнал переривання при виявленні події. Цей сенсор працює в режимі очікування подій та споживає мінімум енергії;

4) OLED-дисплей – модуль виведення інформації, який використовується для зручного відображення повідомлень користувачеві. Він дозволяє миттєво дізнатися тип події, виявленої сенсором, та відстань до джерела блискавки.

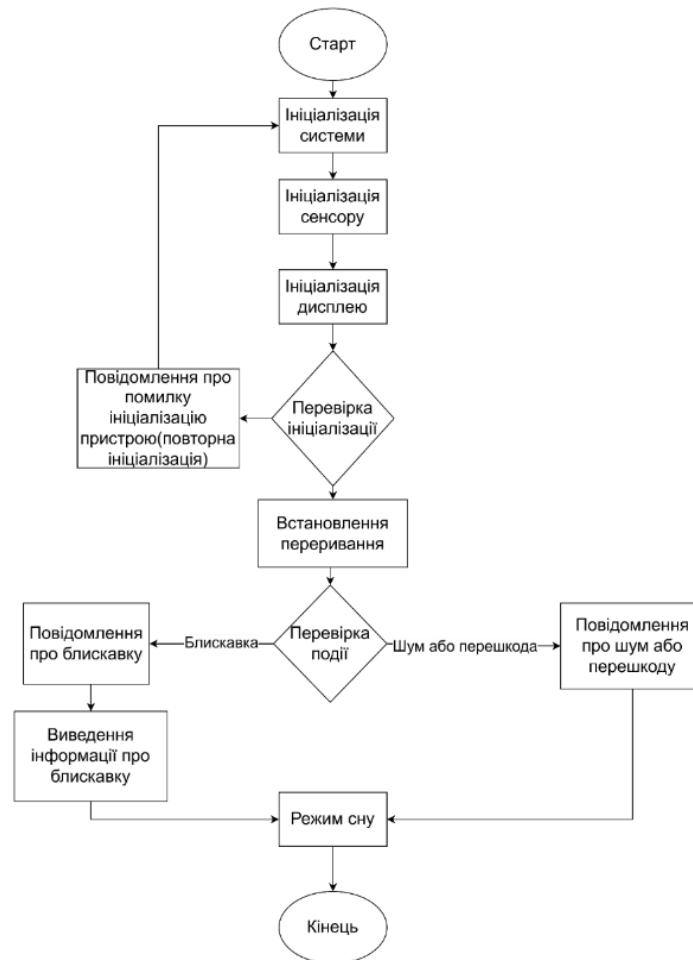


Рисунок 2.5 – Узагальнена блок-схема

Узагальнена блок-схема також передбачає послідовність дій від моменту подачі живлення до завершення одного циклу обробки події. На етапі запуску ініціалізуються всі модулі, проводиться перевірка підключення, а після цього система переходить у режим очікування переривання. Коли подія виявлена, запускається обробник, який отримує детальну інформацію, формує повідомлення для користувача і виводить його дисплей. Після цього система знову переходить у режим очікування.

Таким чином, узагальнена блок-схема дозволяє не лише краще зрозуміти архітектуру проєкту, але й слугує зручним інструментом для його подальшої модернізації. Наприклад, до неї можна легко додати нові сенсори, модулі бездротового зв'язку або автономного живлення, не змінюючи при цьому принципів побудови.

Висновок до розділу 2

У цьому розділі було детально розглянуто процес створення апаратної частини пристрою для виявлення блискавки на основі мікроконтролера ESP32 та спеціалізованого сенсору AS3935. Робота над реалізацією апаратної частини проєкту вимагала не лише глибокого розуміння електронних компонентів та принципів їх взаємодії, а й уважного підходу до збору, налаштування і тестування пристрою на практиці. Особливу увагу було приділено підключенню сенсора через інтерфейс I2C, налаштування OLED-дисплею для відображення інформації, а також обробці переривань, що генеруються сенсором при фіксації атмосферних явищ.

В процесі роботи були враховані як технічні особливості кожного з елементів, так і загальна логіка взаємодії пристрою з навколишнім середовищем. Завдяки гнучкості платформи ESP32 вдалося реалізувати швидкий обмін даними з датчиком, обробку сигналів переривань, а також виведення повідомлень користувачеві через OLED-екран.

Окремо було передбачено можливість керування живленням пристрою через кнопку – що дозволяє економити енергію та зручно користуватися пристроєм у різних умовах.

Таким чином, реалізація апаратної частини заклала надійну основу для подальшого програмного забезпечення пристрою, дозволила протестувати коректність роботи компонентів і переконатися в ефективності обраної архітектури.

Усі апаратні елементи було успішно інтегровано між собою, що свідчить про завершеність і функціональності розробленого рішення на цьому етапі.

3 АПАРАТНО-ПРОГРАМНЕ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ СИСТЕМИ ТА ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ

3.1 Загальна архітектура системи

Розроблена система виявлення електричних розрядів у навколишньому середовищі базується на принципах вбудованих систем з використанням мікроконтролера, датчика блискавки, графічного дисплея та живлення. Архітектура системи побудована таким чином, щоб забезпечити безперервний моніторинг навколишнього середовища, реагувати на події на основі переривань, інформувати користувача через дисплей, давала можливість ручного увімкнення та вимкнення системи та автономну роботу без підключення до зовнішньої мережі.

В табл. 3.1 наведено основні компоненти системи.

Таблиця 3.1 – Основні компоненти

Компонент	Призначення
ESP32	Основний мікроконтролер, що виконує логіку роботи системи
AS3935	Датчик, який визначає блискавки, шумові сигнали або електромагнітні завади
OLED-дисплей SSD1306	Виведення повідомлень про події та стан системи
Програмне середовище Arduino IDE	Розробка та завантаження прошивки мікроконтролера

На рисунку 3.1 зображена логічна схема взаємодії між апаратними та програмними модулями.

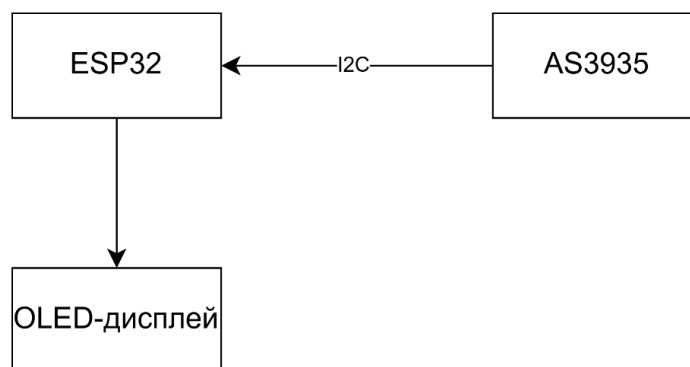


Рисунок 3.1 – Спрощена логічна схема

ESP32 виступає центральним вузлом, який керує всією системою, отримуючи сигнали від сенсора через переривання та виводячи відповідні повідомлення на дисплей. На рисунку 3.2 зображений зібраний макет в реальному житті:

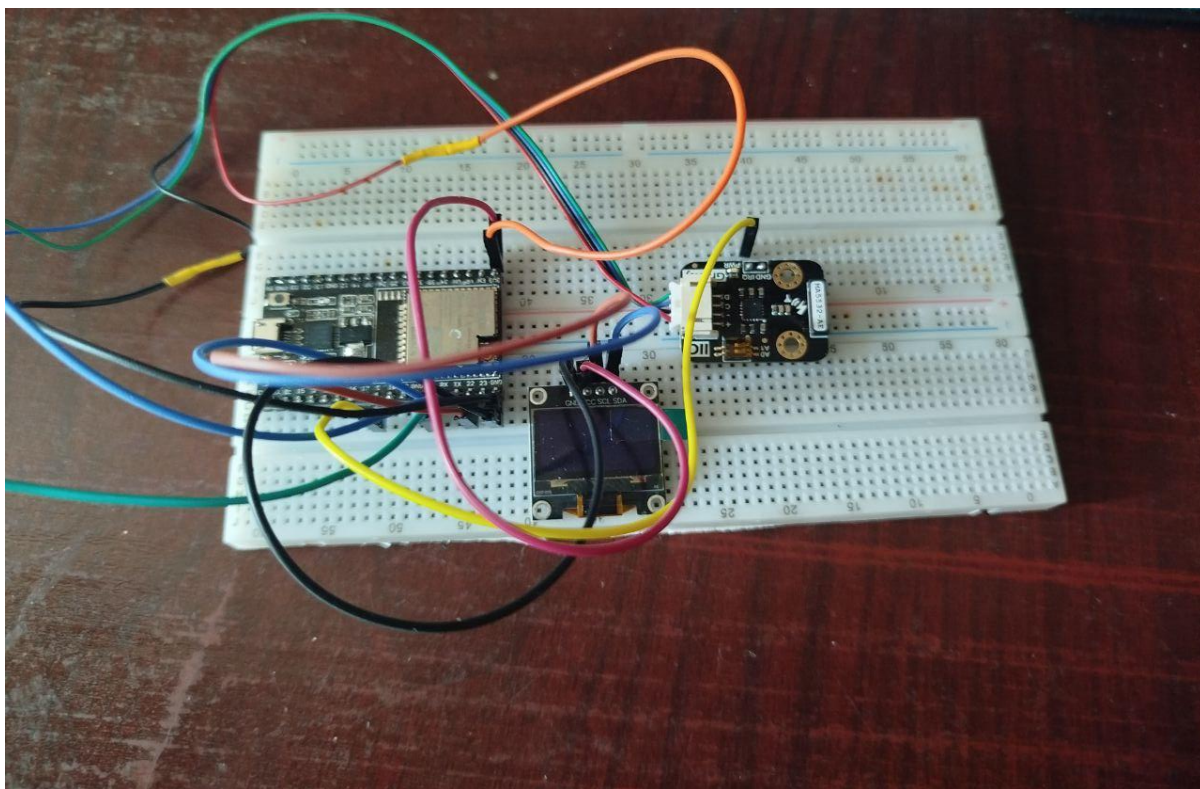


Рисунок 3.2 – Зібрана схема в реальності

Принцип дії системи:

- 1) після подачі живлення на мікроконтролер ініціалізуються всі компоненти;

- 2) датчик блискавки починає моніторинг електромагнітних імпульсів;
- 3) при появі події формується переривання, яке обробляє мікроконтролер;
- 4) мікроконтролер аналізує тип події, считує відстань (якщо це блискавка);
- 5) передача інформацію користувачеві через дисплей;

Сенсор AS3935 виступає рівнем взаємодії з середовищем, безпереривно аналізує електромагнітні сигнали. У разі виявлення події надсилає апаратне переривання на мікроконтролер.

Мікроконтролер ESP32 виступає рівнем логіки прийняття рішень, обробляє сигнал переривання та визначає тип події (блискавка, шум, завада). При виявленні блискавки – зчитує відстань до неї у разі підтвердження події.

OLED-дисплей SSd1306 виступає рівнем взаємодії з користувачем, виводить повідомлення про стан системи або подію.

3.2 Вибір апаратної платформи

У якості апаратної платформи для побудови системи було обрано мікроконтролер ESP32. Даний вибір зумовлений його високою продуктивністю, наявністю вбудованого Wi-Fi, підтримкою інтерфейсу I2C, а також достатньою кількістю GPIO-виводів для підключення зовнішніх пристроїв – зокрема, датчика грози та дисплею.

Детальний опис технічних характеристик мікроконтролера, а також обґрунтування його вибору наведено у розділах 1 і 2 цієї роботи. У цьому розділі лише зазначимо, що обраний мікроконтролер повністю задовольняє функціональні та енергетичні вимоги системи, дозволяючи ефективно реалізувати задану апаратно-програмну архітектуру.

3.3 Опис підключених компонентів

Для реалізації функціоналу системи до мікроконтролера було підключено наступні основні апаратні компоненти: датчик виявлення грози AS3935 та OLED-дисплей SSD1306. Підключення сенсору до мікроконтролера здійснюється через інтерфейс I2C. Крім того, використовується окремий пін (GPIO 5) для обробки апаратного переривання при виявленні події. Це дозволяє системі реагувати на події без необхідності постійного опитування датчика, що знижує енергоспоживання. Дисплей використовується для відображення інформації про виявлення події. Він також підключений через інтерфейс I2C (адреса 0x3C) і живиться від 3.3В.

Таблиця 3.2 – Загальні з'єднання компонентів

Компонент	Підключення до ESP32
AS3935 SDA	GPIO 21
AS3935 SCL	GPIO 22
AS3935 IRQ	GPIO 5
SSD1306 SDA	GPIO 21
SSD1306 SCL	GPIO 22

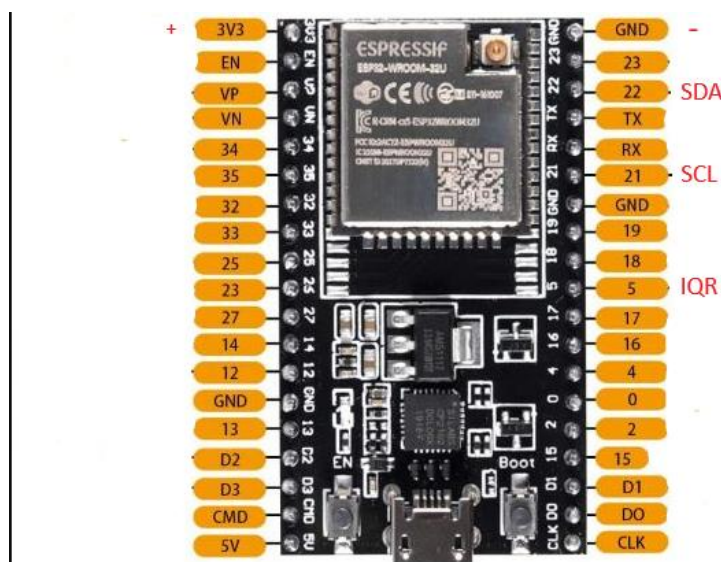


Рисунок 3.3 – Підключення до мікроконтролеру

Підключення та живлення підключено до 3.3В від мікроконтролера до дисплею та датчика. До GPIO 21 та GPIO 22 підключенно SDA та SCL датчика

та дисплею відповідно. Переривання встановлено на GPIO 5. Якщо дивитися на схему пінів мікроконтролеру, то підключення виглядає так:

3.4 Вибір технологій та мови програмування

Для реалізації АПЗ системи моніторингу атмосферних розрядів було вибрано мікроконтролер, що підтримується екосистемою Arduino. Такий вибір зумовлений простотою розробки в Arduino IDE, що забезпечує швидкий старт та простий інтерфейс для програмування мікроконтролерів. В Arduino наявна велика кількість прикладів, адже має велику спільноту користувачів та доступну документацію та бібліотеки, що пришвидшує роботу розробки та усування помилок. Також має підтримку I2C та інших інтерфейсів, що дозволяє легко взаємодіяти з периферією, зокрема з датчиками та дисплеями.

Обрана мова програмування для програмної реалізації функціоналу пристрою була C++, яка є з однією з найпопулярніших мов у галузі вбудованих систем. Зокрема вона є основною мовою, яку підтримує середовище Arduino IDE, що робить її природним вибором для розробки під мікроконтролером типу ESP32.

Мова C++ поєднує в собі елементи процедурного, так і об'єктно-орієнтованого програмування, що дає змогу створювати як прості, так і складні модулі з високим рівнем повторного використання коду. Це особливо актуально при побудові системи, яка може бути розширена у майбутньому додатковими функціями або модулями.

Однією з ключових переваг C++ є її здатність забезпечити низькорівневий доступ до апаратних ресурсів. Завдяки цьому можна безпосередньо працювати з портами вводу\виводу, регістрами та перериваннями мікроконтролера, що критично важливо для реального часу та ефективної взаємодії з сенсорами та іншими пристроями.

Окрім того, використання C++ забезпечує високу продуктивність виконання коду, що є важливим фактором у системах з обмеженими апаратними ресурсами, таких як мікроконтролер. Завдяки цьому пристрій

здатен оперативно реагувати на події, зокрема обробляти апаратні переривання від сенсора, виконувати обчислення та швидко оновлювати дані на дисплеї без затримок і збоїв.

Для розробки програмного забезпечення використовувалося середовище Arduino IDE v 2.3.7, яке забезпечує зручний інтерфейс для написання, компіляції та редактору коду з підсвічуванням синтаксису, вікно виводу компілятора, монітор послідовного порту для налагодження та менеджер бібліотек, що значно спрощує інтеграцію сторонніх модулів.

Завдяки новому рушію на базі платформи Eclipse Theia, IDE версії 2.3.7 забезпечує швидке автодоповнення коду, покращене виявлення помилок та зручну навігацію по проєкту. Середовище підтримує одночасну роботу з кількома вкладками, вбудований Git та розширені можливості конфігурації.

Скріншот інтерфейсу наведено нижче:

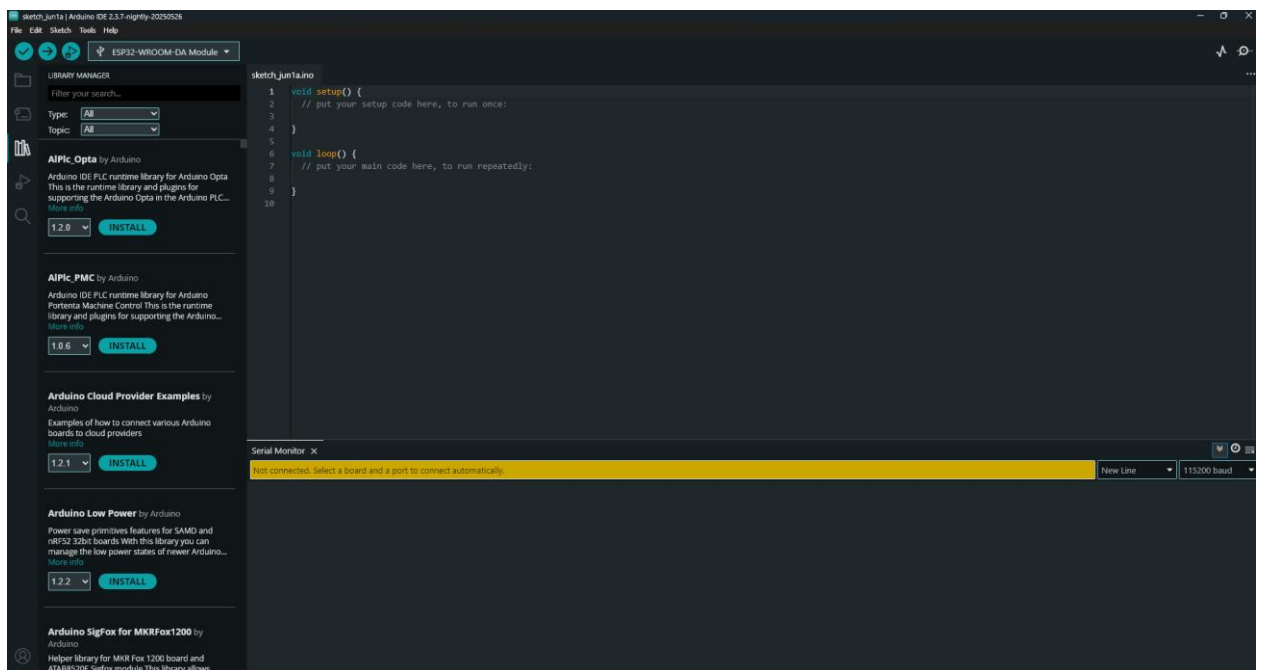


Рисунок 3.4 – Робоча область Arduino IDE

Таблиця 3.3 – Переваги вибору

Критерій	Arduino + ESP32
Швидкість роботи	Висока: велика кількість готових рішень

Стабільність	Перевірена платформа
Енергозбереження	Підтримка режимів сну
Гнучкість	Підтримка зовнішніх бібліотек

В цілому, обрана технологія є оптимальною для прототипування IoT-пристроїв та проведення експериментальних досліджень у сфері метеоспостережень.

3.5 Вибір бібліотек та сторонніх компонентів

У процесі розробки АПЗ для системи виявлення грози було використано низку перевірених бібліотек, що забезпечують коректну та ефективну роботу з апаратними модулями. Нижче наведено перелік ключових бібліотек, які були обрані для реалізації функціональності системи:

Wire – стандартна бібліотека для взаємодії з інтерфейсом I2C. Використовується для обміну даними між мікроконтролером ESP32 та датчиком AS3935, а також з OLED-дисплеєм.

Adafruit_GFX – базова графічна бібліотека, що надає засоби для виведення тексту та графіки на екран. Служить основою для роботи з дисплеєм.

Adafruit_SSD1306 – бібліотека, спеціально розроблена для OLED-дисплеїв із SSD1306. Забезпечує ініціалізацію дисплея, керування буфером та відображення даних.

AS3935I2C – спеціалізована бібліотека для роботи з сенсором виявлення грози AS3935 через шину I2C. Дозволяє зчитувати джерело переривання, визначати тип події (шум, перешкода чи блискавка) та вимірювати відстань до епіцентру активності.

WiFi – бібліотека для підключення ESP32 до бездротової мережі. У поточному проєкті використовується як заготовка для майбутнього розширення функціональності, наприклад, відправлення повідомлення про виявлення грози на віддалений сервер або мобільний пристрій.

Кожна з бібліотек була обрана з урахуванням її сумісності з платформою ESP32, стабільності, документованості та підтримки спільнотою розробників. Також враховувалась наявність прикладів і можливості швидкої інтеграції в Arduino IDE.

Додатково при виборі бібліотек перевага надавалась відкритому програмному забезпеченню з ліцензіями, які дозволять вільне використання, модифікацію та розповсюдження, що відповідає принципам проєктування відкритих вбудованих систем.

3.6 Опис програмної архітектури системи

Програмна архітектура побудована за принципом подієво-орієнтованої моделі, що дозволяє ефективно реагувати на зовнішні сигнали без потреби у постійному опитуванні сенсорів. Основу архітектури складає стандартна структура програм для Arduino-сумісних мікроконтролерів, яка включає функції *setup()* та *loop()*.

setup() – виконується один раз при запуску або перезавантаженні пристрою. Тут здійснюється ініціалізація серійного інтерфейсу, шини I2C для обміну даними з дисплеєм та датчиком, дисплея та його очищення, пінів для кнопки та лінії переривання, підключення переривання для піну, з якого надходить сигнал від датчика.

loop() – головний цикл програми, в якому реалізується перевірка з'єднання з датчиком кожні 5 секунд (для визначення його справності), обробка натискання кнопки BOOT, вивід змін сигналу з піну IRQ (для діагностики), обробка подій переривання(виконання логіки залежно від типу сигналу, що згенерував датчик).

Крім цього, програма має інші важливі функції такі як:

- 1) *handleInterrupt()* – обробник зовнішнього переривання, встановлює прапорець **interruptReceived** у випадку, якщо пристрій увімкнено;
- 2) *initializeSensor()* – ініціалізує датчик грози. У разі невдачі виводить інформацію про помилку;

3) *toggleSystem()* – перемикає режим роботи пристрою (активний/пасивний) включає або вимикає дисплей, відповідно активуючи або вимикаючи переривання;

4) *showMessage(message)* – допоміжна функція для виведення повідомлення на дисплей.

У більшості часу мікроконтролер знаходиться в режимі очікування зовнішньої події. Це дозволить зменшити навантаження на систему та зекономити енергію. Вся логіка на зміни електромагнітного поля покладається на події, що генеруються самим датчиком, завдяки чому забезпечується швидка та точна реакція.

Додатково реалізовано перевірку стану підключення датчика та можливість ручного вимкнення пристрою, що особливо важливо в умовах автономного живлення.

3.7 Керівництво користування

Система призначена для виявлення грозової активності з виведенням відповідної інформації на OLED-дисплей. Для роботи з пристроєм користувачу не потрібно мати спеціальних технічних навичок – достатньо дотримуватись наступної послідовності дій.

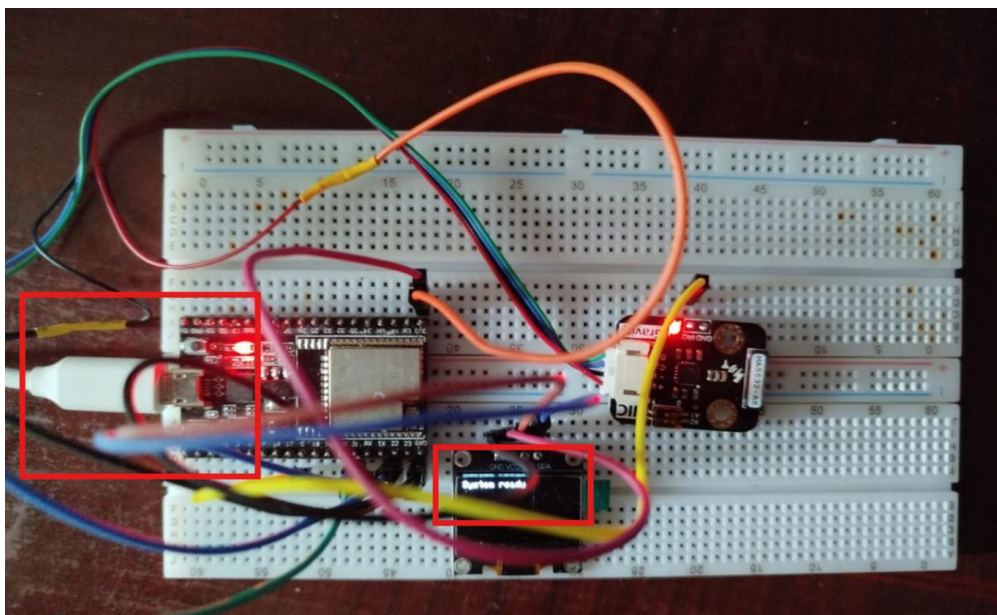


Рисунок 3.5 – Фото готового до використання пристрою

Перший етап це підключення живлення. Так як наш пристрій буде працювати від акумулятору, то цей етап можна пропустити. Інакше, якщо пристрій повинен бути підключений через спеціальний порт. В будь-якому випадку на дисплеї з'явиться повідомлення «System ready», що свідчить про успішну ініціалізацію.

Другий етап це очікування події. У штатному режимі система перебуває у стані очікування. Датчик постійно аналізує електромагнітну обстановку, але дисплей оновлюється лише у разі реєстрації події:

Гроза – повідомлення «Lightning detected» та відстань у км.

Перешкода – повідомлення «Disturber detected».

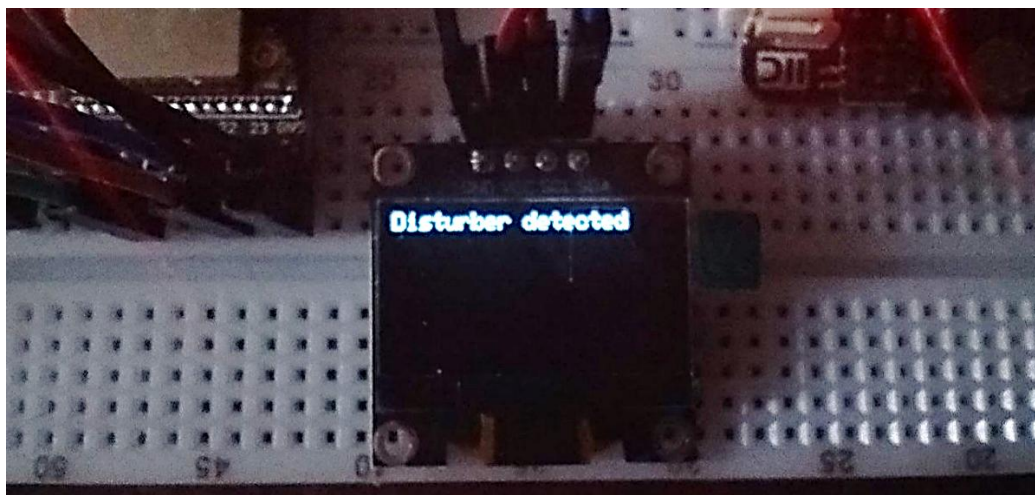


Рисунок 3.6 – Повідомлення про виявлення перешкоди

Шум – повідомлення «Noise detected».



Рисунок 3.7 – Повідомлення про виявлення шумів

В журналі в Arduino IDE ми можемо побачити ось такі повідомлення:

```
Interrupt source: 1  
Noise detected  
IRQ_PIN level: 0  
IRQ_PIN level: 1  
Interrupt source: 4  
Disturber detected  
IRQ_PIN level: 0
```

Рисунок 3.8 – Вивід в журналі подій

Де, «Interrupt source: 1» – це тип події під числовим позначенням 1 (шум). Далі йде пояснення, що було виявлено шум. «IRQ_PIN» це прапорець переривання, де 0 – неактивний, 1 – активний. «Interrupt source: 4» – це тип події під числовим позначенням 4 (перешкода). Далі йде пояснення, що було виявлено перешкоду (Disturber detected).

Третій етап – керування роботою пристрою. За допомогою кнопки BOOT на платі ESP32 користувач може вручну вимкнути або увімкнути виявлення подій. Після натискання – з'явиться повідомлення «Detection disabled», і дисплей вимикається.



Рисунок 3.9 – Повідомлення про це, що виявлення подій вимкнено

При повторному натисканні – система повертається в активний режим з повідомленням «Detection enabled».

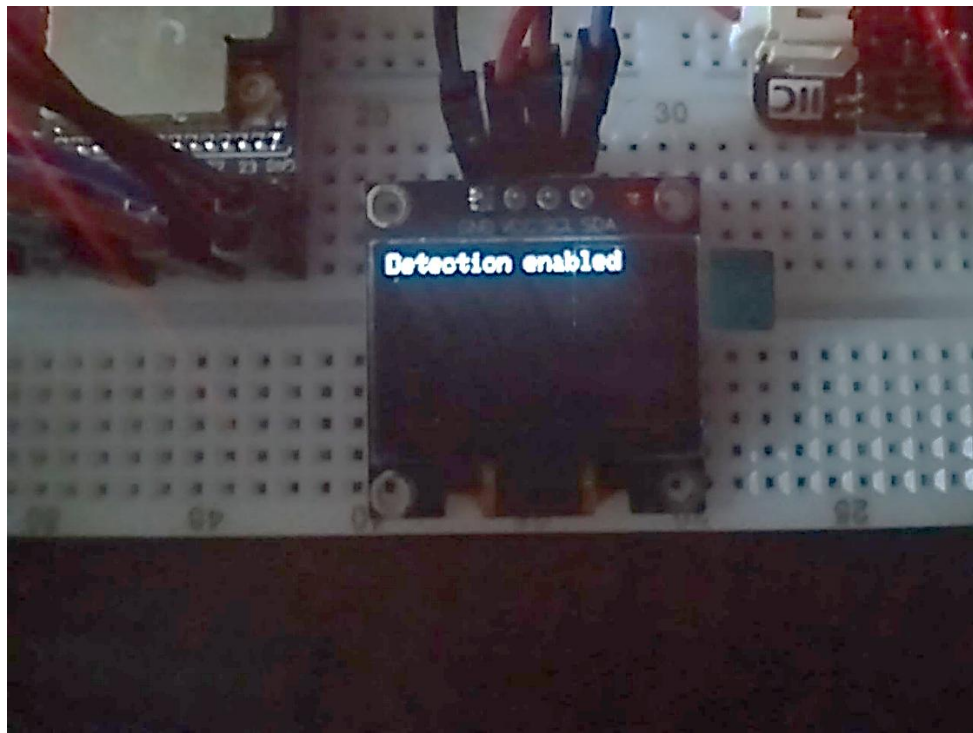


Рисунок 3.10 – Повідомлення про те, що виявлення подій увімкнена, система готова до використання

В журналі подій Arduino відбувається такий вивід:

```
AS3935 initialized
IRQ_PIN level: 0
Detection disabled
Detection enabled
```

Рисунок 3.11 – Повідомлення про вимкнення/увімкнення виявлення подій

Четвертий етап, це діагностика несправностей. У разі втрати зв'язку з датчиком на дисплеї з'явиться повідомлення «Sensor not found», а в серіальний порт буде виведено відповідне попередження. Система автоматично намагається повторно ініціалізувати з'єднання. Також може з'явитися повідомлення «Unknown event». Воно може з'являтися через некоректне зчитування даних, несподіване значення (всього в нас їх 3) або збій в ініціалізації.



Рисунок 3.12 – Повідомлення про невідому подію

В журналі подій ми бачимо:

```
E (121465) i2c.master: I2C hardware timeout detected
E (121465) i2c.master: s_i2c_synchronous_transaction(924): I2C transaction failed
E (121465) i2c.master: i2c_master_multi_buffer_transmit(1186): I2C transaction failed
E (121487) i2c.master: I2C hardware timeout detected
E (121487) i2c.master: s_i2c_synchronous_transaction(924): I2C transaction failed
E (121488) i2c.master: i2c_master_multi_buffer_transmit(1186): I2C transaction failed
AS3935 unresponsive, reinitializing...
E (121556) i2c.master: I2C software timeout
E (121556) i2c.master: s_i2c_synchronous_transaction(924): I2C transaction failed
E (121556) i2c.master: i2c_master_multi_buffer_transmit(1186): I2C transaction failed
```

Рисунок 3.13 – Повідомлення про неініціалізований сенсор

Отже, поради користувачу наступні: у разі автономного живлення рекомендується вручну вимикати дисплей за відсутності необхідності у моніторингу, щоб зекономити енергію. Для перегляду журналу подій можна скористатися серіальним монітором Arduino IDE.

3.8 Тестування системи

Тестування є невід'ємною частиною розробки АПК оскільки дозволяє оцінити працездатність системи, стабільність її функціонування в реальних умовах, а також виявити потенційні помилки або нестабільну поведінку при роботі з датчиком, дисплеєм та обробкою сигналів.

Для перевірки працездатності розробленого пристрою було застосовано функціональне тестування, мета якого –переконатися, що система правильно реагує на події, обробляє сигнали переривання та надає користувачу коректну інформацію через OLED-дисплей. Тестування проводилосьу кілька етапів:

Статистичне тестування без впливу зовнішніх факторів. Було проведено і показано результат в попередньому розділі (Керівництво користування). Було проведено перевірку запуску системи, ініціалізації датчика та дисплея, обробки натискання кнопок.

Таблиця 3.4 – Ключові моменти тестів

№	Сценарій	Очікуваний результат	Результат	Коментар
1	Увімкнення живлення	Ініціалізація дисплея та датчика	Успішно	«System ready» на екрані
2	Натискання кнопки BOOT	Вимкнення виявлення подій	Успішно	OLED вимикається
3	Імітація переривання «Noise»	Виведення повідомлення	Успішно	«Noise detected»
4	Імітація переривання «Disturber»	Виведення повідомлення	Успішно	«Disturber detected»

В цьому розділі ми протестуємо систему шляхом імітації подій. Створимо умови для подачі сигналу переривання на мікроконтролер та перевіримо відповідність реакції. Для тестування нам знадобиться п'єзоелемент. Для цього використовувався стандартний п'єзоелемент, який знаходиться в запальничці. Він буде створювати короткий імпульс, це зафіксує датчик і видасть нам повідомлення про перешкоду.

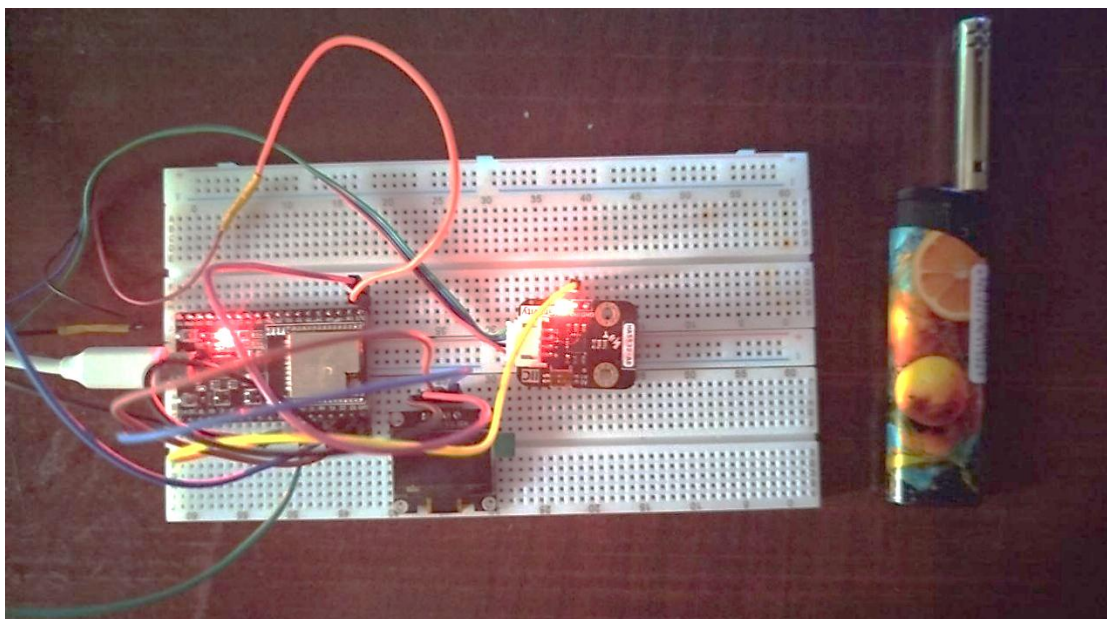


Рисунок 3.14 – Система та запальничка готові до тестування

В момент натиску на кнопку запальнички, п'єзоелемент дає імпульс, що запалює газ у запальнички, в цей момент датчик повинен зафіксувати подію.

Для початку протестуємо фіксацію шуму датчиком.



Рисунок 3.15 – Фото, де датчик фіксує шум

Далі тестуємо з п'єзоелементом.

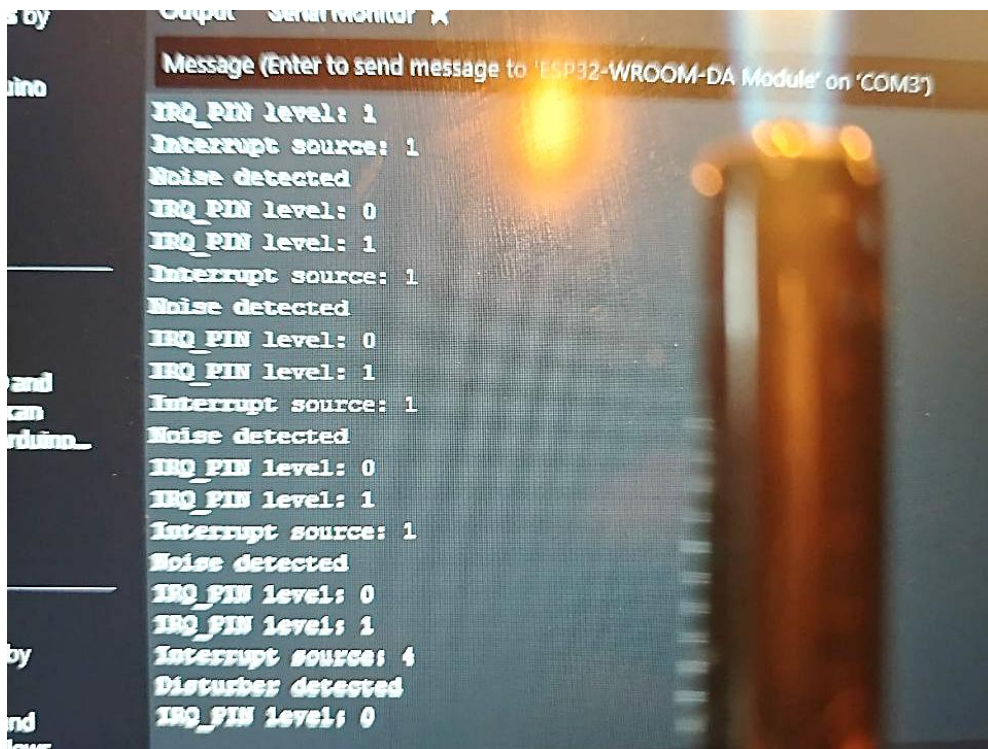


Рисунок 3.16 – Фото, де в момент натиску на п'єзоелемент датчик вловлює сигнал про перешкоду

Датчик не фіксує імпульс від п'єзоелемента як блискавку, адже імпульс занадто короткий як для блискавки, тому фіксується перешкода.

Нажаль, в момент написання цієї роботи грозової активності не було і повноцінно протестувати пристрій в польових умовах не вдалося.



Рисунок 3.17 – Стан погоди в момент написання

Під час тестування всі заплановані сценарії пройшли успішно. Реакція на події була миттєвою, дисплей коректно відображав повідомлення. Також система стабільно функціонувала в автономному режимі понад 24 години без збоїв. Одним з незначних спостережень була поява повідомлення «Unknown event», що виникла у випадках короткочасного або неочікуваного сигналу на лінії переривання. Це може бути викликано нестабільністю сигналу або спотворення даних, що передаються з датчика до мікроконтролера.

Тестування підтвердило, що апаратно-програмна частина системи функціонує коректно, вчасно реагує на події та не створює зайвого енергоспоживання. Всі критичні ситуації були передбачені й оброблені. Надалі можливе впровадження додаткового протоколювання подій або виведення інформації до мобільного застосунку через Wi-Fi для зручності користувача.

3.9 Оцінка якості розробленого АПЗ

Оцінка якості розробленого АПЗ проводилась за кількома ключовими критеріями: функціональність, надійність, зручність використання, продуктивність та масштабність. Система буда протестована як у статичних умовах, так і з імітацією подій за допомогою п'єзоелемента, що дозволило об'єктивно оцінити її ефективність.

Реалізоване АПЗ повністю відповідає поставленим задачам. Мікроконтролер ESP32 коректно взаємодіє з грозовим сенсором AS3935 по шині I2C, обробляє сигнали переривання та виводить інформацію на дисплей. Присутня можливість ручного вимкнення системи за допомогою кнопки BOOT. Інформаційні повідомлення виводяться в зрозумілому форматі, що підвищує зручність користування.

У ході експлуатації система демонструє стабільну роботу. Не спостерігалось зависань, помилок з'єднання або некоректних зчитувань. Випадки повідомлення «Unknown event» є одиничними і пов'язані з апаратною

природою датчика, а не помилкою ПЗ. Додатково реалізовано роботу у разі непередбаченого роз'єднання.

Інтерфейс користувача максимально спрощений – інформація виводиться на екран одразу після виникнення події. Взаємодія з системою зводиться до спостереження за дисплеєм та натискання однієї кнопки для активації або деактивації. Візуальні повідомлення та повідомлення в серіальному моніторі дають змогу легко відстежувати стан системи.

Завдяки використанню апаратного переривання, обробка подій відбувається миттєво після виникнення. Відсутність постійного циклічного опитування датчика дозволяє зменшити навантаження на мікроконтролер та оптимізувати енергоспоживання.

Для підвищення енергоефективності розробленого пристрою доцільно реалізувати програмне вимкнення вбудованих модулів Wi-Fi та Bluetooth у мікроконтролері ESP32, якщо їхня функціональність не використовується під час основної роботи пристрою. Це дозволить суттєво зменшити споживання енергії, особливо у випадку тривалої автономної роботи. У перспективі ж передбачено можливість модернізації пристрою у напрямку IoT, де модуль Wi-Fi можна буде використовувати для передачі даних про грозову активність на хмарні сервіси чи мобільні застосунки, що розширить функціональність пристрою та дозволить створити мережу метеоінформаторів у реальному часі.

Система побудована таким чином, що її можливо розширити або вдосконалити без суттєвої зміни архітектури. Наприклад, можна реалізувати передавання у хмару через Wi-Fi, додати вебінтерфейс або зберігати події у пам'яті.

Розроблене АПЗ відповідає сучасним вимогам до вбудованих систем моніторингу природних явищ. Воно є надійним, ефективним і легко адаптується до нових вимог. Це свідчить про високу якість реалізації та потенціал до подальшого розвитку.

Висновок до розділу 3

У третьому розділі КБР було детально проаналізовано процес побудови апаратно-програмного забезпечення системи для виявлення грози, заснованої на мікроконтролері ESP32 та спеціалізованому сенсорі атмосферної активності AS3935. Запропоноване рішення охоплює як технічний, так і програмний аспекти реалізації, включаючи апаратне з'єднання модулів, написання програмного коду, реалізацією інтерфейсу взаємодії з користувачем та проведення експериментальних досліджень для перевірки працездатності системи.

Важливою складовою даного розділу стало обґрунтування вибору конкретних компонентів. Зокрема, мікроконтролер ESP32 було обрано завдяки його високій продуктивності, підтримці великої кількості периферійних інтерфейсів, а також вбудованому WiFi-модулю, що відкриває можливості для віддаленого моніторингу в подальших розробках. Водночас, сенсор AS3935 було використано як основний засіб виявлення електромагнітних імпульсів, характерних для блискавок, шумів та перешкод у навколишньому середовищі.

Програмна частина реалізована з використанням мови C++ у середовищі Arduino IDE версії 2.3.7, що забезпечило зручний спосіб написання та компіляції коду, а також сумісність з численними бібліотеками, необхідними для роботи з дисплеєм, сенсором та іншими елементами. Було використано бібліотеки Adafruit_SSD1306, Adafruit_GFX для роботи з дисплеєм, а також AS3935I2C – для взаємодії з датчиком грози.

Окрему увагу приділено опису інтерфейсу користувача. OLED-дисплей забезпечує виведення діагностичних повідомлень та результатів спрацювання сенсора, дозволяючи користувачу швидко оцінити стан системи. Додатково передбачена кнопка керування режимом роботи, що дозволяє увімкнути або вимкнути систему за потреби, що особливо актуально при автономному живленні пристрою.

Здійснено серію тестувань роботи системи в умовах імітації електромагнітного впливу, зокрема, за допомогою п'єзoeлемента, що дозволило перевірити спрацювання переривання на вхідному сигналі та реакцію системи в режимі реального часу. Також проведено перевірку надійності роботи при відключенні та повторному підключенні сенсора, що виявило стабільну роботу системи, включаючи повторну ініціалізацію у випадку втрати зв'язку по I2C.

У підсумку було здійснено загальну оцінку якості розробленого АПЗ. Зокрема, система відповідає основним критеріям ефективності:

Функціональність – забезпечується точне визначення типу електромагнітної події;

Надійність – система стабільно працює протягом тривалого часу без збоїв;

Зручність використання – користувач отримує наочну інформацію через дисплей і може легко керувати пристроєм.

Енергозбереження – реалізовано пасивний режим очікування подій, дисплей вимикається вручну;

Маштабованість – система може бути вдосконалена додаванням функцій бездротової передачі даних, розширенням елементної бази тощо.

Таким чином, розроблене апаратно-програмне рішення повністю виконує поставлені задачі та демонструє високій рівень ефективності при роботі в умовах реального середовища. Отримані результати свідчать про доцільність подальшого розвитку системи, зокрема інтеграції з іншими пристроями, додавання режимів сну та створення мобільного застосунку для дистанційного моніторингу атмосферних умов.

ВИСНОВКИ

У ході виконання КБР було розроблено портативний детектор блискавок на основі мікросхеми AS3935 та мікроконтролера ESP32, що дозволяє ефективно виявляти атмосферні електричні розряди в реальному часі. Результати розробки відповідають меті, поставленій у вступі, а всі проставлені завдання виконано у повному обсязі:

- проведено огляд предметної сфери та проаналізовано існуючі рішення, щодо виявлення блискавок та їх технічних особливостей та мінусів використання;
- досліджено принцип роботи та характеристики датчика AS3935;
- визначено спеціальні вимоги до апаратно-програмного забезпечення;
- розроблено схему апаратної частини пристрою з урахуванням вимог до портативності та енергоефективності;
- реалізовано програмне забезпечення для обробки даних із датчика AS3935 та його виведення результатів користувачу;
- протестувано пристрій в умовах, наближених до реальних, та оцінити його ефективність.

На відміну від більшості існуючих аналогів, що орієнтовані на стаціонарне застосування або вимагають значних енергетичних ресурсів(рішення від Vaisala, Franklin Technologies, Boltek тощо), розроблений пристрій вирізняється компактністю, енергоефективністю та придатністю до автономної роботи в польових умовах.

Практична цінність проекту полягає в тому, розроблена система може застосовуватись в умовах, де недоцільно або неможливо використовувати великогабаритне обладнання: у сільському господарстві, під час туристичних подорожей, рятувальних операцій, а також у військових діях для інформування підрозділів про можливу зміну погодних умов.

У рамках виконання роботи було враховано можливість підвищення енергоефективності пристрою шляхом програмного вимкнення модулів Wi-Fi та Bluetooth мікроконтролера ESP32, що є актуальним для забезпечення тривалої автономної роботи в польових умовах. Крім того, передбачено перспективу подальшої модернізації системи в напрямку IoT – зокрема, реалізацію функції бездротової передачі даних про грозову активність через Wi-Fi для віддаленого моніторингу, зберігання та аналізу в хмарних сервісах або мобільних застосунках. Це відкриває можливості для розширення функціональності пристрою та його інтеграції в розподілені системи спостереження.

Було проведено тестування пристрою з використанням п'єзоелементів для емуляції імпульсних сигналів, що дало змогу перевірити стабільність обробки сигналів перешкод та реакцію системи на зовнішні впливи. Всі тести показали задовільні результати, що свідчить про надійність обраного рішення.

Зроблено прогноз щодо подальшого розвитку системи – зокрема, можна додати передавання даних по Wi-Fi для централізованого моніторингу атмосферних умов або інтеграцію з мобільним застосунком для сповіщень у реальному часі.

Узагальнюючи результати роботи, можна стверджувати, що поставлена мета досягнута. Розроблена система повністю виконує функцію виявлення атмосферної електричної активності, а також відповідає всім вимогам щодо портативності, ефективності та зручності використання. Вона має потенціал до практичного впровадження у цивільній, аграрній та оборонній сферах.

ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ

1. Ghosh B., Ghosh A., Dey D., Dalai S., Chatterjee B. A Scheme For Local Lightning Detection And Prediction System. *2020 IEEE Applied Signal Processing Conference (ASPCON)*. Kolkata, India, Oct. 07–09 2020. P. 369–373. DOI: 10.1109/ASPCON49795.2020.9276699.
2. AS3935 Franklin Lightning sensor. *Tasmota*. URL: <https://tasmota.github.io/docs/AS3935/> (Last accessed: 02.06.2025).
3. Nerella O. and Ahmed S. M. Deployment of LoRa Based Lightning Safety Awareness and Alert system with Announcement in Remote Areas. *2023 IEEE 5th International Conference on Cybernetics, Cognition and Machine Learning Applications (ICCCMLA)*. Hamburg, Germany, Oct 07–08 2023, P. 621–625, DOI: 10.1109/ICCCMLA58983.2023.10346755.
4. A. Heilmann et al Detection Efficiency Analysis of Atmospheric Discharges Using AS3935 Sensor : Data Correlation of LINET Network., *2019 International Symposium on Lightning Protection (XV SIPDA)*, Sao Paulo, Brazil, 2019, P. 1-7, DOI: 10.1109/SIPDA47030.2019.8951657.
5. I. Mialdea-Flor et al. Development of a low-cost iot system for lightning strike detection and location. *Electronics*. 2020. Vol. 8, № 12. P. 1512. DOI:10.3390/electronics8121512
6. Esp32 solar weather station-v1 - share project - pcbway. China PCB Prototype & Fabrication Manufacturer - *PCB Prototype the Easy Way*. URL: https://www.pcbway.com/project/shareproject/Esp32_Solar_Weather_Station_V1_4561b818.html (Last accessed: 08.05.2025).
7. Nerella O., Ahmed S. M., Balakrishnan P. Experimental evaluation of lightning and weather alert methods in rural india using lora and iot technology with nanosensors. *Journal of nanomaterials*. 2024. Vol. 20. P. 1–18. DOI. 10.1155/2023/7734847
8. Extreme weather monitoring with specialized sensors. *Hackster.io*. URL: <https://www.hackster.io/bluetiger9/extreme-weather-monitoring-with-specialized-sensors-da426f> (Last accessed: 08.05.2025).

9. GitHub - evsc/thunderandlightning: let's sense lightning and make thunder. with the AS3935 franklin lightning sensor™ IC. *GitHub*. URL: <https://github.com/evsc/ThunderAndLightning> (date of access: 08.05.2025).
10. GitHub - shred/kaminari: AS3935 and ESP8266 based Franklin Lightning Detector. *GitHub*. URL: <https://github.com/shred/kaminari> (Last accessed: 08.05.2025).
11. Gravity: Lighting Sensor SKU: SEN0290 - *DRFobot*. URL: [https://wiki.dfrobot.com/Gravity: Lighting Sensor SKU: SEN0290](https://wiki.dfrobot.com/Gravity:LightningSensorSKU:SEN0290) (Last accessed: 08.05.2025).
12. Arshad N. S. et al. High intensity lightning recognition system using Very Low Frequency signal features. *Journal of atmospheric and solar-terrestrial physics*. 2020. Vol. 216 P. 105520. DOI: 10.1016/j.jastp.2020.105520
13. Lighting & Thunderstorm – *World Map*. URL: <https://www.blitzortung.org> (Last accessed: 08.05.2025).
14. Da Silva T. A. et al. New model for weather stations integrated to intelligent meteorological forecasts in Brasilia. *Sensors*. 2025. Vol. 25, № 11. P. 3432. DOI:10.3390/s25113432
15. Yoon Y.-H. Operation of PV power generation facilities using lightning detectors. The transactions of the korean institute of electrical engineers. 2022. Vol. 71, № 12. P. 1868–1873. DOI:10.5370/kiee.2022.71.12.1868
16. AS3935 lightning detector hookup guide (v20). *SparkFun* URL: <https://learn.sparkfun.com/tutorials/sparkfun-as3935-lightning-detector-hookup-guide-v20> (Last accessed: 03.06.2025).
17. SparkFun Electronics. Product showcase: sparkfun lightning detector, 2019. *YouTube*. URL: <https://www.youtube.com/watch?v=txJ-x6xisYY> (Last accessed: 08.05.2025).
18. Zhang L. et al. Study on the construction of lightning protection and safety supervision system in fujian. *Advances in intelligent systems and computing*. Cham, 2020. P. 147–152. DOI:10.1007/978-3-030-00214-5_19

19. SwitchDoc Labs. Tuning the as3935 lighting detector - the thunderboard, 2019. *YouTube*. URL: <https://www.youtube.com/watch?v=fTEEDfWbGEU> (Last accessed: 08.05.2025).

20. Afanasiev V., Fustii V., Kompaniiets O., Maksymov M., Afanasiev Y. and Tymochko O. Synthesis Method for Sensor Systems and UAVs in the Problem of Monitoring Lightning. *2022 IEEE 9th International Conference on Problems of Infocommunications, Science and Technology (PIC S&T)*, Kharkiv, Ukraine, 2022, P. 315-319, DOI: 10.1109/PICST57299.2022.10238485.

21. Салтовський Б., Баклан А., Створення портативного детектора блискавок на основі датчика AS3935. «Могилянські читання – 2024: досвід та тенденції розвитку суспільства в Україні: глобальний, національний та регіональний аспекти» 6 листоп. 2024 р. Миколаїв, 2024. С. 279. URL: <https://dspace.chmnu.edu.ua/jspui/bitstream/123456789/2507/1/Технічні%20науки.pdf> (дата звернення: 08.05.2025).

ДОДАТОК А

Код програми

```
#include <Wire.h>
#include <Adafruit_GFX.h>
#include <Adafruit_SSD1306.h>
#include <AS3935I2C.h>
#include <WiFi.h>

// OLED
#define SCREEN_WIDTH 128
#define SCREEN_HEIGHT 64
#define OLED_ADDR 0x3C
Adafruit_SSD1306 display(SCREEN_WIDTH, SCREEN_HEIGHT, &Wire, -1);

// AS3935
#define IRQ_PIN 5
#define AS3935_ADDR 0x03
AS3935I2C lightning(AS3935_ADDR, IRQ_PIN);

// Button
#define BUTTON_PIN 0
volatile bool interruptReceived = false;
bool systemEnabled = true;

void IRAM_ATTR handleInterrupt() {
    if (systemEnabled) interruptReceived = true;
}

void showMessage(const char* message) {
    display.clearDisplay();
    display.setCursor(0, 0);
    display.setTextSize(1);
    display.setTextColor(SSD1306_WHITE);
    display.println(message);
    display.display();
}

bool initializeSensor() {
    if (!lightning.begin()) {
        Serial.println("AS3935 not found!");
        showMessage("Sensor not found");
        return false;
    }
    Serial.println("AS3935 initialized");
    showMessage("System ready");
    return true;
}

void toggleSystem() {
    systemEnabled = !systemEnabled;
}
```

```
if (systemEnabled) {
    interruptReceived = false;

    pinMode(IRQ_PIN, INPUT);
    delay(2);

    if (digitalRead(IRQ_PIN) == HIGH) {
        uint8_t src = lightning.readInterruptSource();
        Serial.print("Cleared stale IRQ, source: ");
        Serial.println(src);
    }

    attachInterrupt(digitalPinToInterrupt(IRQ_PIN), handleInterrupt, RISING);

    display.ssd1306_command(SSD1306_DISPLAYON);
    Serial.println("Detection enabled");
    showMessage("Detection enabled");
} else {
    detachInterrupt(digitalPinToInterrupt(IRQ_PIN));
    interruptReceived = false;

    showMessage("Detection disabled");
    delay(1000); // показати повідомлення перед вимкненням
    display.ssd1306_command(SSD1306_DISPLAYOFF);

    Serial.println("Detection disabled");
}
}

void setup() {
    WiFi.mode(WIFI_OFF);
    btStop();
    Serial.begin(115200);
    Wire.begin(21, 22);

    pinMode(BUTTON_PIN, INPUT_PULLUP);
    pinMode(IRQ_PIN, INPUT);
    attachInterrupt(digitalPinToInterrupt(IRQ_PIN), handleInterrupt, RISING);

    if (!display.begin(SSD1306_SWITCHCAPVCC, OLED_ADDR)) {
        Serial.println("SSD1306 init failed");
        while (1);
    }
    display.clearDisplay();
    display.display();

    initializeSensor();
    showMessage("System ready");
}

void loop() {
    // Check AS3935 every 5s
    static unsigned long lastCheck = 0;
```

```
if (millis() - lastCheck > 5000) {
    lastCheck = millis();
    Wire.beginTransaction(AS3935_ADDR);
    if (Wire.endTransmission() != 0) {
        Serial.println("AS3935 unresponsive, reinitializing...");
        initializeSensor();
    }
}

// Check button
static bool lastButtonState = HIGH;
bool currentButtonState = digitalRead(BUTTON_PIN);
if (lastButtonState == HIGH && currentButtonState == LOW) {
    toggleSystem();
    delay(300); // simple debounce
}
lastButtonState = currentButtonState;

// IRQ level debug
static int lastLevel = -1;
int level = digitalRead(IRQ_PIN);
if (level != lastLevel) {
    Serial.print("IRQ_PIN level: ");
    Serial.println(level);
    lastLevel = level;
}

// Handle AS3935 interrupt
if (interruptReceived) {
    interruptReceived = false;

    uint8_t src = lightning.readInterruptSource();
    display.clearDisplay();
    display.setCursor(0, 0);
    display.setTextSize(1);
    display.setTextColor(SSD1306_WHITE);

    Serial.print("Interrupt source: ");
    Serial.println(src);

    if (src == 0) return;

    switch (src) {
        case 0x01:
            Serial.println("Noise detected");
            display.println("Noise detected");
            break;
        case 0x04:
            Serial.println("Disturber detected");
            display.println("Disturber detected");
            break;
        case 0x08: {
            Serial.println("Lightning detected");
            display.println("Lightning detected");
        }
```

```
int dist = lightning.readStormDistance();
Serial.print("Distance: ");
Serial.print(dist);
Serial.println(" km");
display.print("Distance: ");
display.print(dist);
display.println(" km");
break;
}
default:
    Serial.println("Unknown event");
    display.println("Unknown event");
    break;
}
display.display();
}
```

ДОДАТОК Б

Матеріали апробації роботи

Міністерство освіти і науки України
Чорноморський національний університет імені Петра Могили
ДНУ «Інститут модернізації змісту освіти»
Південний науковий центр НАН та МОН
Інститут української археографії та джерелознавства
імені М. С. Грушевського НАН України
Первинна профспілкова організація ЧНУ ім. Петра Могили



«МОГИЛЯНСЬКІ ЧИТАННЯ – 2024:
досвід та тенденції розвитку суспільства в Україні:
глобальний, національний та регіональний аспекти»

XXVII Всеукраїнська науково-практична конференція

ТЕЗИ ДОПОВІДЕЙ

ТЕХНІЧНІ НАУКИ

Миколаїв, 6–10 листопада 2024 року

Миколаїв – 2024

Рисунок Б.1 – Тези доповідей

Підсекція:
КОМП'ЮТЕРНА ІНЖЕНЕРІЯ

УДК 004.021

*Баклан А. О.,
бакалаврант,
Салтовський Б. Г.,
старший викладач кафедри комп'ютерної інженерії,
ЧНУ імені Петра Могили, м. Миколаїв, Україна*

СТВОРЕННЯ ПОРТАТИВНОГО ДЕТЕКТОРА БЛИСКАВОК НА ОСНОВІ ДАТЧИКА AS3935

Для деяких категорій людей (туристи, військові, радіоаматори тощо) необхідно знати, у випадку грози, відстань до блискавок та їх наближення або віддалення. Для цього необхідний пристрій-детектор блискавок. Оскільки такі ситуації можуть відбуватися у польових умовах, бажано щоб такий пристрій-детектор був у портативному форм-факторі.

Для вирішення цієї проблеми пропонується портативний пристрій на основі плати SEN0290 від DFRobot [1]. Датчик блискавки використовує сучасну мікросхему AMS AS3935 Franklin IC та спеціальну антену Coilcraft MA5532-AE для визначення відстані, сили та частоти блискавок на дистанції до 40 км. Завдяки вбудованому алгоритму, що знижує вплив штучних електричних перешкод, пристрій може ефективно уникати завад від побутової техніки. Модуль приєднується до обчислювального пристрою за протоколом ІІС та працює від напруги від 3,3 до 5 вольт (рис. 1).

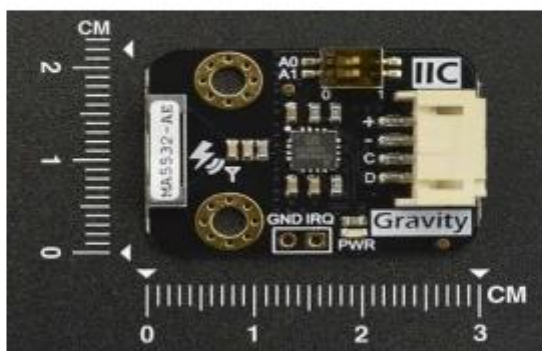


Рис.1. Плата SEN0290 від DFRobot

101

Рисунок Б.2 – Перша сторінка

В якості обчислювального пристрою пропонується використання плати на основі мікроконтролера ESP32 (рис. 2).

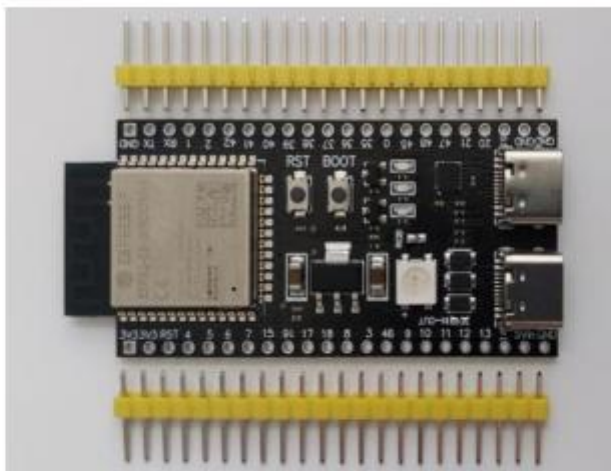


Рис.2. Плата ESP32-S3 Development Board

Для виведення інформації застосовується OLED-дисплей 0,96" 128 x 64 SPI (рис. 3).

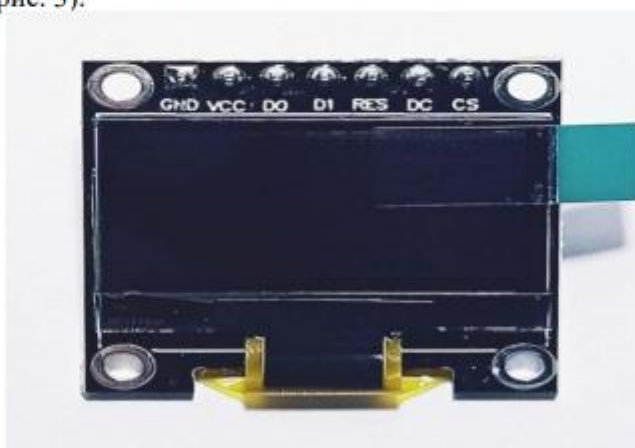


Рис.3. OLED-дисплей SSD1306

Пристрій також оснащується акумулятором та платою менеджменту живлення.

Загальна схема пристрою має вигляд, як наведено на рис. 4.

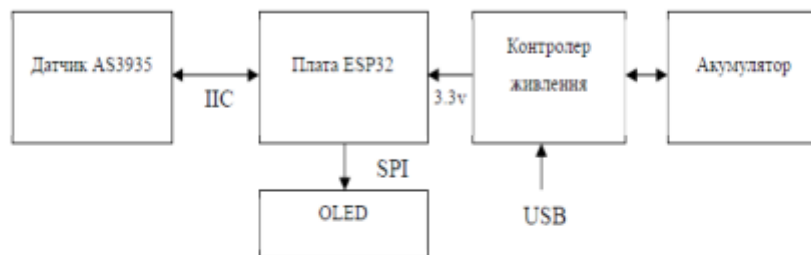


Рис.4. Загальна схема пристрою

Перспективним напрямом розвитку системи є створення мережі зі стаціонарних датчиків, яка дозволить за допомогою триангуляційних алгоритмів відслідковувати переміщення грозового фронту. Подібні проекти існують (наприклад, Blitzortung [2]), але в глобальному масштабі та з використанням більш коштовного обладнання.

Список використаних джерел

1. Gravity: Lightning Sensor SKU: SEN0290 - DRFobot. URL: <https://wiki.dfrobot.com/Gravity: Lightning Sensor SKU: SEN0290> (Last accessed: 07.10.2024).
2. Lightning & Thunderstorm – World Map. URL: <https://www.blitzortung.org> (Last accessed: 07.10.2024).

Рисунок Б.4 – Третя сторінка

ДОДАТОК В

Блок-схема роботи алгоритму сенсора та роботи пристрою

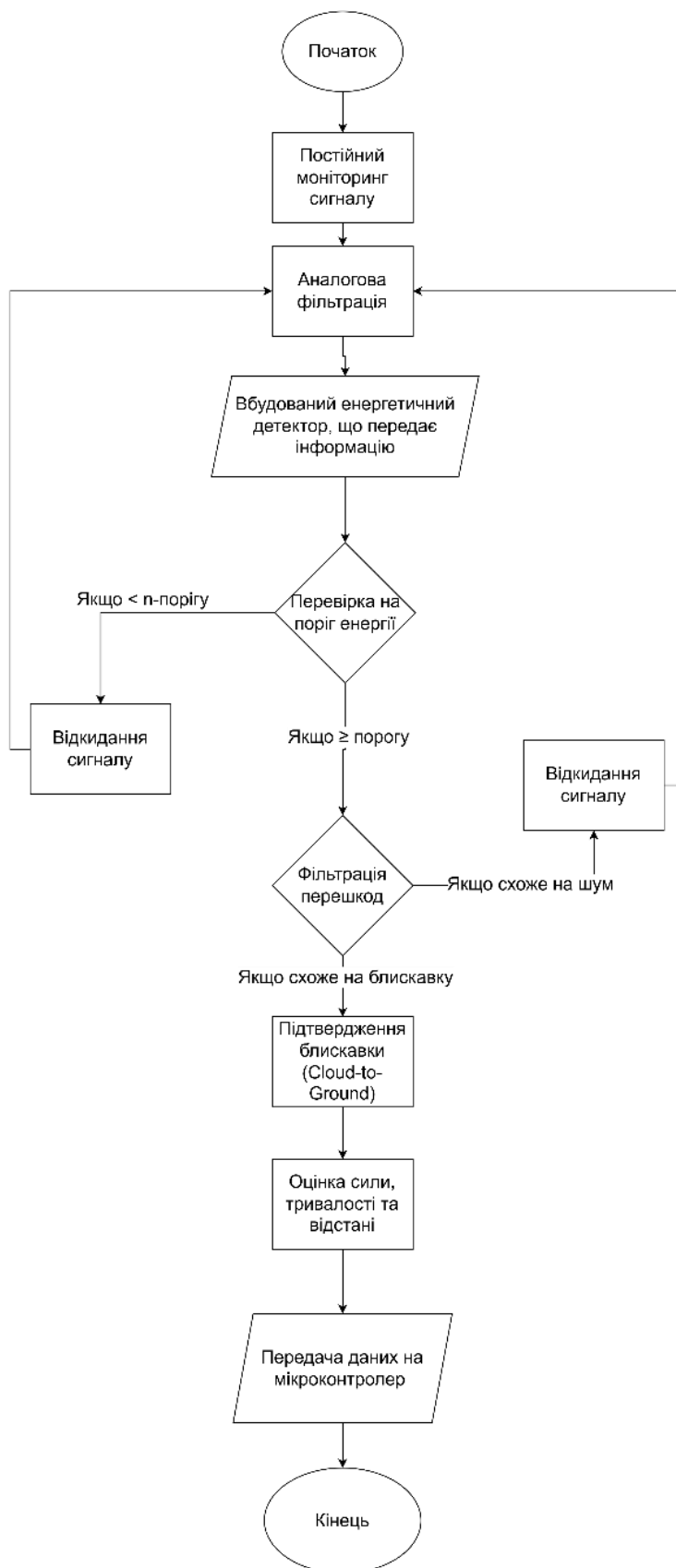


Рисунок В.1 – Блок-схема роботи алгоритму сенсору

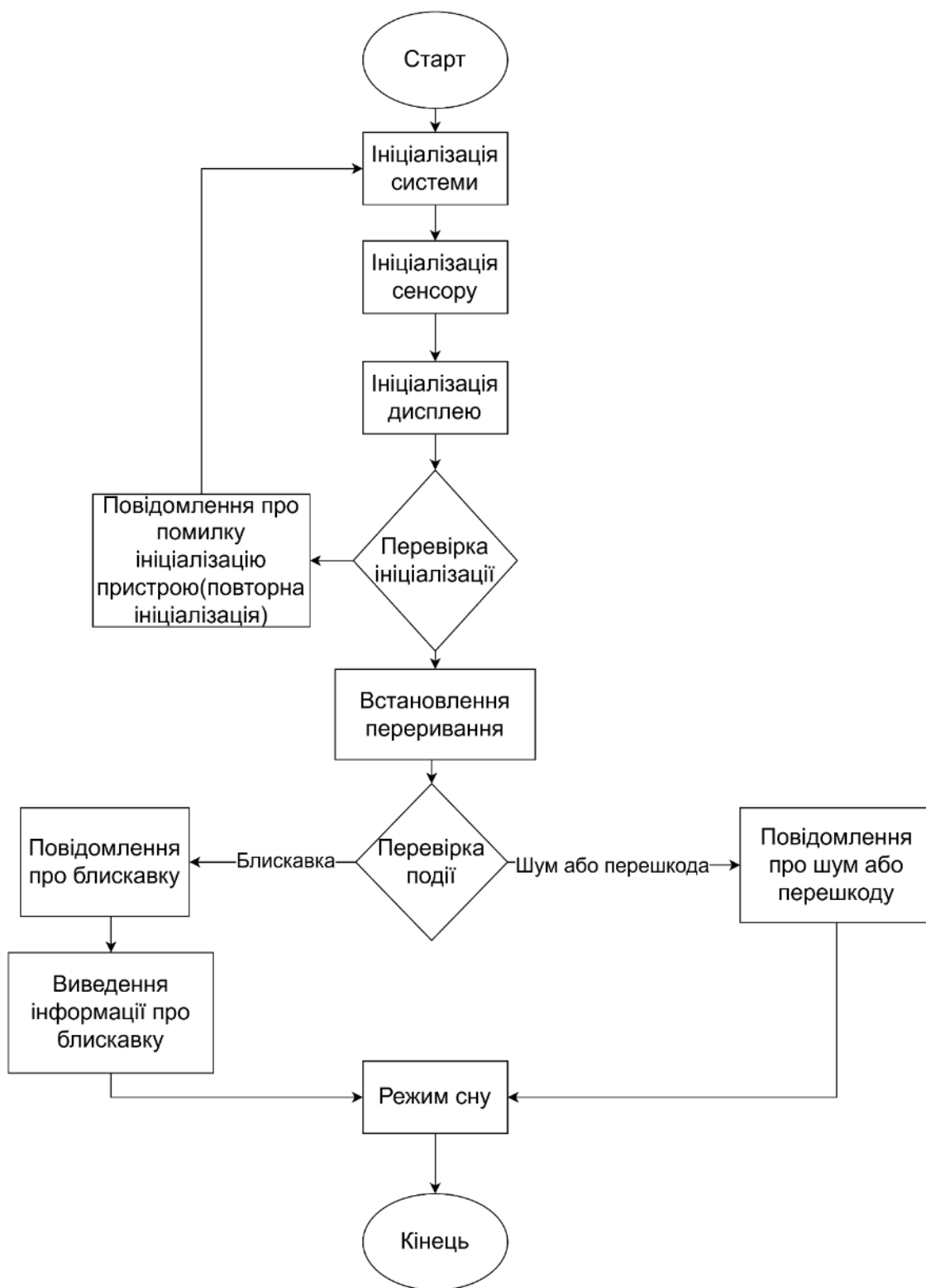


Рисунок В.2 – Узагальнена блок-схема роботи АПЗ