

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

Кіберфізична система моніторингу метеорологічних параметрів для малих аеродромів на підставі методів машинного навчання

Рівень вищої освіти другий (магістерський)

Галузь знань 12 «Інформаційні технології»

Шифр, назва

Спеціальність 123 «Комп'ютерна інженерія»

Шифр, назва

Освітня програма «Комп'ютерна інженерія та програмування»

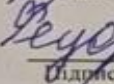
Шифр КВРКІ 240258.24.02.34 ПЗ

Виконав здобувач II курсу, група КІ2м-24-2


Підпис

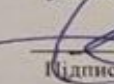
Валерій ЯКИМОВСЬКИЙ
Ініціали, прізвище

Керівник д.-техн. наук, професор
Науковий ступінь, учене звання


Підпис

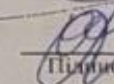
Свген ФЕДОРОВ
Ініціали, прізвище

Нормоконтролер д. техн. наук, професор
Науковий ступінь, учене звання


Підпис

Сергій ЛИСЕНКО
Ініціали, прізвище

До захисту допускаю:
завідувач кафедри КІС


Підпис

Ольга ПАВЛОВА
Ініціали, прізвище

«01» травня 2026 р.

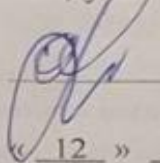
дата

ХМЕЛЬНИЦЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

Факультет ІНФОРМАЦІЙНИХ ТЕХНОЛОГІЙ
Кафедра КОМП'ЮТЕРНОЇ ІНЖЕНЕРІЇ ТА ІНФОРМАЦІЙНИХ СИСТЕМ
Рівень вищої освіти ДРУГИЙ (МАГІСТЕРСЬКИЙ)
Галузь знань 12 ІНФОРМАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ
Спеціальність 123 КОМП'ЮТЕРНА ІНЖЕНЕРІЯ
Освітня програма «КОМП'ЮТЕРНА ІНЖЕНЕРІЯ ТА ПРОГРАМУВАННЯ»

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри КІС



Ольга ПАВЛОВА

« 12 » січня 2026 р.

ЗАВДАННЯ НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ

Якимовському Валерію Віталійовичу

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи: Кіберфізична система моніторингу метеорологічних параметрів для малих аеродромів на підставі методів машинного навчання

затверджена наказом ректора від "12" січня 2026 року № 6 /ст.

Керівник проєкту (роботи): Федоров Євген Євгенович, д.т.н., проф.

Прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання

Затверджена наказом ректора університету від 12.01.2026 р. № 6

2. Термін подання здобувачем роботи на кафедру 01.05.2026 р.

3. Вихідні дані до роботи Завдання на кваліфікаційну роботу

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

Аналіз принципів моніторингу метеорологічних параметрів аеродромів;

Розробка апаратної частини кіберфізичної системи моніторингу метеорологічних параметрів для малих аеродромів;

Розробка програмної частини кіберфізичної системи моніторингу метеорологічних параметрів для малих аеродромів;

Опис і тестування розробленої системи.

5. Перелік графічного матеріалу (із зазначенням обов'язкових креслень)

6. Консультанти розділів кваліфікаційної роботи

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

7. Дата видачі завдання « 12 » 01 2026 р.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ п/п	Назва етапів (розділів) кваліфікаційної роботи магістра	Термін виконання етапів проекту (роботи)	Примітка
1	Проаналізувати літературу за темою роботи та аналіз існуючих систем	12.01.2026	виконано
2	Проаналізувати існуючі технології	15.01.2026	виконано
3	Проаналізувати компоненти систем моніторингу даних про метеоумови	31.01.2026	виконано
4	Розробити алгоритми інтеграції системи з відкритими базами	27.02.2026	виконано
5	Реалізувати програмну частину комп'ютеризованої системи моніторингу	13.03.2026	виконано
6	Провести тестування розробленої системи	27.03.2026	виконано
7	Оформлення пояснювальної записки згідно вимог	25.04.2026	виконано
8	Попередній захист ВКР	26.04.2026	виконано
9	Захист ВКР на засіданні ЕК	травень 2026 року	виконано

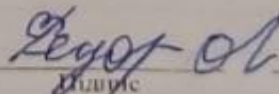
Здобувач


Підпис

Валерій ЯКИМОВСЬКИЙ

Ім'я, ПРІЗВИЩЕ

Керівник кваліфікаційної роботи


Підпис

Свген ФЕДОРОВ

Ім'я, ПРІЗВИЩЕ

РЕФЕРАТ

Тема кваліфікаційної роботи магістра: “Кіберфізична система моніторингу метеорологічних параметрів для малих аеродромів на підставі методів машинного навчання”.

Автор роботи: Якимовський Валерій Віталійович.

Керівник роботи: Федоров Євген Євгенович.

Пояснювальна записка: 93 стор., 43 рис., 3 табл., 2 дод., 81 джерело.

СИСТЕМА МОНІТОРИНГУ МЕТЕОРОЛОГІЧНИХ ДАНИХ, МАЛИЙ АЕРОДРОМ, МЕТЕОРОЛОГІЧНІ ДАНІ, КІБЕРФІЗИЧНА СИСТЕМА.

Об’єктом дослідження є процес моніторингу метеорологічних параметрів на малих аеродромах.

Предметом дослідження є методи та засоби збору, синхронізації та обробки метеорологічних даних із використанням технологій кіберфізичних систем та методів машинного навчання.

Метою кваліфікаційної роботи магістра є розробка кіберфізичної системи моніторингу метеорологічних параметрів для малих аеродромів на підставі методів машинного навчання, яка забезпечує підвищення точності, оперативності та достовірності отримання метеорологічної інформації.

Методи дослідження: для розв’язання поставлених задач у роботі використано методи системного аналізу, проєктування кіберфізичних систем, методи збору та обробки метеорологічних даних, а також елементи математичного моделювання. Для підвищення якості обробки інформації застосовано підходи машинного навчання, а експериментальна частина базувалася на методах прототипування та тестування апаратно-програмних комплексів.

Наукова новизна отриманих результатів:

– набув подальшого розвитку метод інтеграції метеорологічних даних з різнорідних джерел для малих аеродромів на основі використання кіберфізичного підходу та адаптивної обробки інформації;

– набула подальшого розвитку інформаційна технологія моніторингу метеорологічних параметрів за рахунок поєднання апаратних засобів збору даних із методами машинного навчання для підвищення достовірності та оперативності отриманих результатів.

Практична значущість роботи полягає у розробці прототипу кіберфізичної системи моніторингу метеорологічних параметрів, яка забезпечує збір, передачу та обробку даних у реальному часі. Запропоноване рішення може бути використане для підвищення безпеки польотів на малих аеродромах, а також інтегроване в існуючі інформаційні системи.

У першому розділі виконано аналіз принципів моніторингу метеорологічних параметрів аеродромів, розглянуто сучасні підходи до збору та синхронізації даних, а також досліджено можливості застосування методів машинного навчання у задачах обробки метеорологічної інформації.

У другому розділі здійснено розробку апаратної частини кіберфізичної системи, обґрунтовано вибір компонентів, розроблено схему підключення та реалізовано прототип пристрою для збору метеоданих.

У третьому розділі розроблено програмну частину системи, включаючи алгоритми збору, обробки, інтеграції та передачі даних, а також забезпечено взаємодію між компонентами системи, включаючи алгоритми збору, обробки, інтеграції та передачі даних, а також забезпечено взаємодію між компонентами системи

У четвертому розділі представлено робочі вікна системи і проведено тестування компоненту аналізу з використанням ШІ.

ЗМІСТ

Скорочення та умовні позначки	7
Вступ.....	8
1 Аналіз принципів моніторингу метеорологічних параметрів аеродромів.....	10
1.1 Аналіз апаратних засобів збору метеорологічних даних.....	10
1.2 Аналіз методів збору і синхронізації метеорологічних даних з відкритих джерел.....	15
1.2.1 Основні засади збору метеорологічних даних для аеродромів.....	16
1.2.2 Особливості синхронізації даних з різних джерел.....	18
1.3 Аналіз методів машинного навчання для моніторингу метеорологічних параметрів малих аеродромів.....	20
1.4 Постановка задачі дослідження.....	23
1.5 Висновки до розділу 1	25
2 Розробка апаратної частини кіберфізичної системи моніторингу метеорологічних параметрів для малих аеродромів.....	27
2.1 Схема поєднання компонентів апаратної частини кіберфізичної системи моніторингу метеорологічних параметрів.....	27
2.2 Підбір компонентів апаратної частини комп'ютеризованої системи моніторингу метеорологічних параметрів.....	29
2.2.1 вибір апаратної платформи	29
2.2.2 вибір сенсора вимірювання температури	32
2.2.3 вибір сенсора вимірювання атмосферного тиску	35
2.2.4 вибір сенсора вимірювання температури	39
2.2.5 підбір bluetooth модуля.....	42
2.2.6 інтеграція компонентів апаратної частини.....	44
2.3 Програмування апаратної частини комп'ютеризованої системи моніторингу метеорологічних параметрів	47
2.4 Розробка алгоритму опитування датчиків.....	49
2.5 Висновки до розділу 2	53

3 Розробка програмної частини кіберфізичної системи моніторингу метеорологічних параметрів для малих аеродромів.....	54
3.1 Дерево функцій системи моніторингу метеорологічних даних на малих аеродромах	54
3.2 Моделювання процесів в комп'ютеризованій системі моніторингу метеорологічних параметрів для малих аеродромів.....	59
3.3 Вибір програмних інструментів для реалізації основних модулів серверної частини системи	66
3.4 Висновки до розділу 3	73
4 Опис і тестування розробленої системи	74
4.1 Опис розробленого інтерфейсу.....	74
4.2 Тестування засобів штучного інтелекту в розробленій системі	78
4.3 Висновки до розділу 4	82
Висновки	83
Перелік джерел посилань	85
Додаток А Програмний код апаратного модуля	94
Додаток Б Публікація тези	97
Додаток В Презентація	99

СКОРОЧЕННЯ ТА УМОВНІ ПОЗНАКИ

AMOSS – Aviation Meteorological Observation and Reporting System (Система авіаційного метеорологічного спостереження та звітності)

AIXM – Aeronautical Information Exchange Model (Модель обміну аеронавігаційною інформацією)

ASOS – Automated Surface Observing System (Автоматизована система спостережень на поверхні)

ATIS – Automatic Terminal Information Service (Автоматична служба термінальної інформації)

AWOS – Automated Weather Observing System (Автоматизована система метеорологічного спостереження погоди)

GUI – Graphical User Interface (Графічний інтерфейс користувача)

METAR – Meteorological Aerodrome Report (Аеродромна метеорологічна звітність)

XML – Extensible Markup Language (Розширювана мова розмітки)

XML-RPC – XML Remote Procedure Call (Віддалений виклик процедури XML)

ВСТУП

У сучасних умовах розвитку авіаційної галузі особливого значення набуває забезпечення безпеки польотів, яке значною мірою залежить від точності та своєчасності метеорологічної інформації. Метеорологічні параметри, такі як температура повітря, атмосферний тиск, вологість, швидкість і напрямок вітру, безпосередньо впливають на процеси зльоту, посадки та навігації повітряних суден.

Традиційні системи метеорологічного забезпечення базуються на використанні спеціалізованих станцій спостереження, що забезпечують високу точність вимірювань, проте їх впровадження потребує значних фінансових витрат і складної інфраструктури [1]. Це створює суттєві обмеження для малих аеродромів, які часто не мають можливості використовувати повноцінні метеорологічні комплекси.

Сучасний розвиток інформаційних технологій відкриває нові можливості для вирішення зазначеної проблеми. Зокрема, використання відкритих джерел метеорологічних даних, супутникових систем та сенсорних мереж дозволяє значно розширити доступ до інформації та знизити витрати на створення систем моніторингу [2]. Проте інтеграція таких джерел супроводжується проблемами синхронізації, узгодженості та достовірності даних.

Важливим напрямом підвищення ефективності систем моніторингу є застосування методів машинного навчання, які дозволяють здійснювати прогнозування метеорологічних параметрів, виявляти аномалії та обробляти великі обсяги даних [3]. Поєднання цих підходів із концепцією кіберфізичних систем створює передумови для формування нових інтелектуальних рішень у сфері метеорологічного забезпечення авіації.

Об'єкт дослідження: процес моніторингу метеорологічних параметрів на малих аеродромах.

Предмет дослідження: методи та засоби збору, синхронізації та обробки метеорологічних даних із використанням технологій кіберфізичних систем та методів машинного навчання.

Мета дослідження: розробка кіберфізичної системи моніторингу метеорологічних параметрів для малих аеродромів на підставі методів машинного навчання, яка забезпечує підвищення точності, оперативності та достовірності отримання метеорологічної інформації.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити такі задачі:

1. Провести аналіз існуючих методів збору метеорологічних даних та визначити їх особливості для малих аеродромів.
2. Дослідити підходи до інтеграції та синхронізації даних із різних джерел, включаючи відкриті інформаційні сервіси та сенсорні мережі.
3. Проаналізувати сучасні методи машинного навчання для обробки та прогнозування метеорологічних параметрів.
4. Розробити архітектуру кіберфізичної системи моніторингу метеорологічних параметрів.
5. Реалізувати програмні модулі збору, синхронізації та аналізу даних.
6. Провести оцінку ефективності запропонованої системи.

Наукова новизна полягає у розробці підходу до побудови кіберфізичної системи моніторингу метеорологічних параметрів, яка поєднує інтеграцію відкритих джерел даних із методами машинного навчання для підвищення точності та оперативності обробки інформації.

Практичне значення роботи полягає у можливості впровадження розробленої системи на малих аеродромах для підвищення рівня безпеки польотів, зниження витрат на створення метеорологічної інфраструктури та оптимізації процесів прийняття рішень.

1 АНАЛІЗ ПРИНЦИПІВ МОНІТОРИНГУ МЕТЕОРОЛОГІЧНИХ ПАРАМЕТРІВ АЕРОДРОМІВ

1.1 Аналіз апаратних засобів збору метеорологічних даних

Сучасні системи збору метеорологічної інформації базуються на використанні спеціалізованих апаратних засобів, які забезпечують вимірювання, первинну обробку та передачу параметрів навколишнього середовища. У контексті авіаційної галузі, особливо для малих аеродромів, такі системи відіграють критично важливу роль, оскільки саме від якості та оперативності отриманих даних залежить безпека виконання польотів.

Апаратна складова систем моніторингу метеорологічних параметрів включає комплекс сенсорних пристроїв, мікроконтролерів, модулів передачі даних та допоміжної електроніки. Вони утворюють фізичний рівень системи, який у сучасній інтерпретації розглядається як базовий компонент кіберфізичної системи, що забезпечує взаємодію між реальним середовищем та цифровими сервісами.

До основних параметрів, що підлягають вимірюванню, належать температура повітря, атмосферний тиск, відносна вологість, швидкість та напрямок вітру, а також наявність опадів. Для отримання цих даних використовуються відповідні типи сенсорів, які можуть відрізнятися за точністю, швидкодією, вартістю та умовами експлуатації.

Професійні метеорологічні системи, що застосовуються в авіації, характеризуються високою точністю та надійністю, однак їх впровадження на малих аеродромах часто обмежується фінансовими та технічними ресурсами. У зв'язку з цим актуальним є використання компактних і відносно недорогих рішень, побудованих на базі мікроконтролерних платформ та доступних сенсорів.

Серед сучасних рішень можна виділити декілька типових представників професійних метеостанцій, які демонструють різні підходи до реалізації систем збору даних. Такі системи, як Vaisala WXT530, Campbell Scientific CR800, Davis Vantage Pro2 та Hobo Weather Station, реалізують інтегровані рішення для

вимірювання ключових метеорологічних параметрів і можуть використовуватися як еталонні або базові при розробці власних систем.

1. Vaisala Weather Transmitter WXT530: дана метеорологічна система є багатофункціональним сенсорним модулем, який об'єднує в одному корпусі декілька типів вимірювальних елементів. Вона забезпечує одночасне вимірювання температури повітря, відносної вологості, атмосферного тиску, швидкості та напрямку вітру, а також інтенсивності та типу опадів. Важливою особливістю пристрою є відсутність рухомих механічних частин для вимірювання вітру, що підвищує його надійність і довговічність. Система підтримує цифрові інтерфейси передачі даних та може інтегруватися у складні автоматизовані системи моніторингу, що робить її придатною для використання в авіаційній інфраструктурі (рис. 1.1).



Рисунок 1.1 – Вигляд станції Vaisala Weather Transmitter WXT530

2. Campbell Scientific CR800 – це універсальний програмований логер (реєстратор) даних, який використовується для збору та обробки інформації з різноманітних сенсорів. Пристрій підтримує підключення широкого спектра метеорологічних датчиків і дозволяє реалізовувати складні алгоритми обробки сигналів безпосередньо на рівні контролера. Завдяки високій точності вимірювань, гнучкості налаштування та можливості роботи в автономному режимі, CR800 широко застосовується у наукових дослідженнях та промислових системах моніторингу навколишнього середовища (рис. 1.2).



Рисунок 1.2 – Вигляд універсального програмованого логера
Campbell Scientific CR800

3. Davis Vantage Pro2 є комплексною автоматизованою метеостанцією, яка поєднує в собі набір сенсорів для вимірювання температури, вологості, атмосферного тиску, швидкості та напрямку вітру, а також кількості опадів. Система оснащена бездротовим модулем передачі даних, що дозволяє передавати інформацію на базову станцію або комп'ютер для подальшого аналізу. Вона характеризується відносно високою точністю та доступністю, що робить її популярною як у професійному, так і у напівпрофесійному використанні (рис. 1.3).



Рисунок 1.3 – Davis Vantage Pro2

4. Hobo Weather Station – це компактне рішення для моніторингу кліматичних параметрів, яке орієнтоване на простоту встановлення та експлуатації. Система дозволяє вимірювати основні метеорологічні показники, такі як температура, вологість, атмосферний тиск і опади, та передавати їх через сучасні бездротові інтерфейси. Завдяки малим габаритам і низькому енергоспоживанню вона часто використовується в розподілених IoT-системах, де важливими є автономність та швидкість розгортання (рис. 1.4).



Рисунок 1.4 – Hobo Weather Station

Кожна з проаналізованих метеорологічних систем характеризується індивідуальним набором технічних параметрів, функціональних можливостей та експлуатаційних обмежень, що безпосередньо впливає на доцільність її застосування в конкретних умовах. Вибір відповідного рішення визначається не лише точністю вимірювань та стабільністю роботи обладнання, але й такими факторами, як умови навколишнього середовища, рівень автоматизації процесів, вимоги до оперативності отримання даних, а також економічна доцільність впровадження.

Зокрема, високоточні професійні системи, як правило, забезпечують мінімальні похибки вимірювань та підтримують широкий спектр параметрів, однак їх використання супроводжується значними витратами на придбання,

встановлення та обслуговування. У той же час більш доступні рішення мають спрощену архітектуру та нижчу точність, проте можуть бути ефективними у випадках, коли не вимагається високий рівень деталізації даних або коли система використовується як допоміжний елемент моніторингу.

Порівняльний аналіз розглянутих систем дозволяє здійснити комплексну оцінку їх технічних та експлуатаційних характеристик, включаючи точність, надійність, масштабованість, вартість та можливості інтеграції. На основі такого аналізу формується обґрунтований вибір оптимального рішення для побудови системи моніторингу метеорологічних параметрів на малих аеродромах, що враховує як технічні вимоги, так і економічні обмеження (табл. 1.1).

Таблиця 1.1 – Порівняльна таблиця систем моніторингу метеорологічних параметрів

Критерії	Vaisala WXT530	Campbell CR800	Davis Vantage Pro2	Hobo Weather Station
Тип датчиків	Температура, вологість, тиск, вітер, опади	Температура, вологість, тиск, вітер, опади	Температура, вологість, тиск, вітер, опади	Температура, вологість, тиск, опади
Точність вимірювань	Висока (промисловий рівень, до $\pm 0.1 - 0.3$ °C, ± 1 гПа)	Висока (залежить від сенсорів, лабораторного рівня)	Висока (± 0.5 °C, $\pm 3\%$ RH)	Помірна ($\pm 1 - 2$ °C, $\pm 5\%$ RH)
Підключення та передача даних	RS-232, RS-485, USB, Ethernet, SDI-12	RS-232, RS-485, USB, Ethernet, SDI-12	RS-232, USB, бездротовий канал	USB, Bluetooth, Wi-Fi
Вартість	Висока (професійний сегмент)	Висока (науковий сегмент)	Середня	Помірна

Особливу роль відіграють також можливості інтеграції обладнання у сучасні інформаційні та кіберфізичні системи. Наявність стандартних інтерфейсів передачі даних, підтримка мережевих протоколів та сумісність із IoT-рішеннями значно підвищують цінність системи в умовах побудови розподілених платформ моніторингу. У контексті малих аеродромів це є критично важливим, оскільки дозволяє об'єднувати дані з різних джерел, здійснювати їх централізовану обробку та забезпечувати оперативний доступ до інформації для прийняття рішень.

Результати порівняння створюють основу для подальшого вдосконалення системи шляхом впровадження сучасних підходів, зокрема використання методів машинного навчання для обробки та прогнозування метеорологічних даних, а також інтеграції з кіберфізичними системами управління. Це дозволяє не лише підвищити точність та надійність отримуваної інформації, але й забезпечити адаптивність системи до змін зовнішніх умов, що є особливо актуальним для авіаційної галузі.

1.2 Аналіз методів збору і синхронізації метеорологічних даних з відкритих джерел

Збір, обробка та передача метеорологічної інформації є базовими процесами функціонування сучасних систем моніторингу, зокрема в авіаційній галузі, де точність та оперативність даних безпосередньо впливають на безпеку польотів і ефективність управління повітряним рухом. Теоретичні основи організації метеорологічних спостережень, методи вимірювання атмосферних параметрів та особливості використання відповідного обладнання детально розглянуті у класичних навчальних і наукових працях [1], [2].

Особливості авіаційної метеорології, включаючи специфіку оцінювання погодних умов для забезпечення польотів, а також вимоги до точності та періодичності оновлення даних, описані у роботах [3], де підкреслюється критична роль своєчасного отримання інформації про стан атмосфери. Технічні засоби

гідрометеорологічного забезпечення, їх структура та принципи функціонування, що лежать в основі сучасних систем збору даних, наведені у джерелах [4].

У контексті забезпечення безпеки польотів особливого значення набуває якість метеорологічної інформації, що підтверджується результатами аналізу авіаційних подій, у яких погодні умови виступають одним із ключових факторів ризику [6]. Додатково, оцінка кліматичних умов та їх вплив на експлуатацію авіаційної техніки розглядається у дослідженнях [7], [8], що дозволяє враховувати довгострокові зміни атмосферних процесів.

Сучасні підходи до збору метеорологічних даних передбачають використання не лише локальних вимірювальних станцій, але й інтеграцію інформації з різних джерел, включаючи супутникові спостереження, глобальні кліматичні моделі та відкриті інформаційні сервіси [9]. У рамках авіаційних проєктів, таких як COAST, розробляються системи підвищення обізнаності щодо погодних умов, які об'єднують різноманітні джерела даних [5, 10–12].

Паралельно з розвитком технічних засобів відбувається активне впровадження методів математичного моделювання атмосферних процесів, що дозволяє не лише аналізувати поточні дані, але й прогнозувати їх зміни [15–17], [21]. У поєднанні з сучасними підходами до обробки даних, зокрема використанням нейронних мереж для прогнозування погодних параметрів [13].

Останніми роками значного поширення набули підходи, що базуються на використанні IoT та кіберфізичних систем, які дозволяють організувати збір даних у реальному часі з великої кількості розподілених сенсорів [22–24]. При цьому застосування методів інтеграції та узгодження даних дозволяє підвищити їх достовірність та забезпечити узгодженість інформації [25].

1.2.1 Основні засади збору метеорологічних даних для аеродромів

Збір метеорологічних даних для аеродромів є одним із ключових елементів забезпечення безпеки польотів, оскільки погодні умови безпосередньо впливають на процеси зльоту, посадки та навігації повітряних суден. Основні принципи

організації метеорологічних спостережень базуються на систематичності, точності вимірювань, своєчасності передачі інформації та її відповідності встановленим стандартам [1, 2].

У класичних підходах метеорологічні дані отримуються за допомогою наземних станцій, які забезпечують вимірювання основних параметрів атмосфери: температури повітря, відносної вологості, атмосферного тиску, швидкості та напрямку вітру, а також інтенсивності та типу опадів [1, 4]. Для авіаційних потреб ці параметри мають визначатися з підвищеною точністю та з високою частотою оновлення, що обумовлено динамічністю атмосферних процесів у зоні аеродрому [3].

Важливою особливістю збору метеорологічної інформації для аеродромів є просторова прив'язка вимірювань. Дані повинні відображати реальні умови безпосередньо в зоні злітно-посадкової смуги, руліжних доріжок та прилеглого повітряного простору. З цією метою використовуються спеціалізовані метеорологічні майданчики, розташовані відповідно до нормативних вимог, що забезпечують репрезентативність вимірювань [4].

Окрім наземних вимірювань, важливу роль відіграє використання даних дистанційного зондування та глобальних метеорологічних моделей, що дозволяє отримувати інформацію про стан атмосфери на різних висотах та прогнозувати зміну погодних умов [9]. Такий підхід є особливо актуальним для малих аеродромів, які не завжди оснащені повним комплексом вимірювального обладнання.

Значну увагу приділяють стандартизації процесів збору даних. Для авіаційної метеорології встановлено чіткі вимоги до форматів представлення інформації (наприклад, METAR, SPECI), періодичності оновлення та допустимих похибок вимірювань [3]. Дотримання цих стандартів забезпечує сумісність даних між різними системами та можливість їх використання в автоматизованих системах управління польотами.

Практичний аналіз авіаційних подій свідчить про те, що недостатня точність або несвоєчасність метеорологічної інформації може призводити до виникнення

небезпечних ситуацій [6]. Це підкреслює необхідність використання надійних джерел даних та впровадження систем контролю їх якості.

Сучасні тенденції розвитку систем збору метеорологічних даних пов'язані з використанням розподілених сенсорних мереж та технологій IoT, які дозволяють організувати безперервний моніторинг погодних умов у режимі реального часу [22, 24]. Такі системи забезпечують високу масштабованість та гнучкість, що є важливим для адаптації до умов конкретного аеродрому.

Додатково застосовуються методи інтеграції даних з різних джерел, які дозволяють підвищити достовірність отриманої інформації шляхом порівняння та узгодження значень параметрів [25].

1.2.2 Особливості синхронізації даних з різних джерел

Синхронізація метеорологічних даних, отриманих із різнорідних джерел, є однією з ключових задач при побудові сучасних систем моніторингу, особливо у випадку використання відкритих сервісів, сенсорних мереж та кіберфізичних систем. Основна складність полягає у необхідності узгодження даних, що надходять із різною частотою, у різних форматах та з різним рівнем достовірності.

У традиційних системах метеорологічних спостережень дані формуються з визначеною періодичністю та у стандартизованому вигляді, що значно спрощує їх використання [1, 3]. Однак у сучасних умовах інтеграції відкритих джерел, таких як онлайн-сервіси, супутникові системи та IoT-пристрої, виникає проблема асинхронності потоків даних та їх неоднорідності [22, 24].

Однією з основних особливостей синхронізації є різниця у часових інтервалах оновлення інформації. Наприклад, локальні сенсори можуть передавати дані щосекунди, тоді як відкриті API оновлюють інформацію з інтервалом у декілька хвилин або навіть годин. Це призводить до необхідності приведення даних до єдиної часової шкали шляхом використання часових міток (timestamp) та інтерполяційних методів [25].

Ще однією важливою проблемою є різні формати представлення даних. Метеорологічна інформація може передаватися у вигляді структурованих повідомлень (JSON, XML), текстових кодів (METAR) або у вигляді потокових даних. Для їх узгодження застосовуються методи нормалізації, які передбачають перетворення даних до єдиного формату та одиниць вимірювання [3, 4].

У системах, що об'єднують декілька джерел інформації, виникає також проблема різної точності вимірювань. Наприклад, дані з професійних метеостанцій можуть мати значно меншу похибку порівняно з даними, отриманими з відкритих онлайн-ресурсів або недорогих сенсорів. Для підвищення достовірності використовуються методи інтеграції даних, які дозволяють об'єднувати інформацію з декількох джерел та формувати узгоджене значення параметра [25].

Особливу роль у синхронізації відіграють механізми буферизації та черг повідомлень. Вони дозволяють накопичувати дані, що надходять із різною швидкістю, та обробляти їх у відповідному порядку. Такий підхід є характерним для сучасних розподілених систем, де обробка даних відбувається у режимі реального часу або з мінімальними затримками [22].

У кіберфізичних системах моніторингу важливим є також забезпечення узгодженості між фізичними вимірюваннями та цифровими моделями. Це досягається шляхом використання алгоритмів синхронізації станів системи, які враховують часові затримки, пропущені значення та можливі аномалії у даних. У таких системах синхронізація виступає не лише як технічна задача, а як складова забезпечення коректності функціонування всієї системи.

Застосування методів машинного навчання дозволяє додатково підвищити ефективність синхронізації даних. Зокрема, нейронні мережі можуть використовуватися для відновлення пропущених значень, виявлення аномалій та прогнозування параметрів у випадках, коли дані з окремих джерел є неповними або затриманими [13, 28]. Це особливо актуально для систем моніторингу метеорологічних параметрів, де безперервність та достовірність інформації мають критичне значення.

У авіаційних системах, зокрема в рамках сучасних дослідницьких проєктів, реалізуються комплексні підходи до інтеграції та синхронізації метеоданих, що дозволяють підвищити ситуаційну обізнаність та забезпечити підтримку прийняття рішень [10, 12]. Такі системи об'єднують дані з різних джерел у єдину інформаційну платформу, забезпечуючи їх узгодженість та актуальність.

1.3 Аналіз методів машинного навчання для моніторингу метеорологічних параметрів малих аеродромів

Сучасний розвиток інформаційних технологій зумовив активне впровадження методів машинного навчання у системи збору, обробки та прогнозування метеорологічних даних. Для малих аеродромів це має особливе значення, оскільки такі об'єкти часто функціонують в умовах обмеженої кількості локального обладнання, нестачі спеціалізованого персоналу та необхідності швидкого прийняття рішень на основі неповної або неоднорідної інформації. У цих умовах машинне навчання дозволяє не лише автоматизувати аналіз погодних параметрів, але й підвищити точність оцінки стану атмосфери, виявлення небезпечних відхилень та побудови короткострокових прогнозів [13, 22, 25].

Класичні підходи до аналізу метеорологічних параметрів ґрунтуються на фізичних моделях атмосферних процесів, статистичному аналізі часових рядів та експертних правилах [15–17, 21]. Такі методи залишаються важливими, однак у багатьох практичних задачах вони виявляються недостатньо гнучкими для роботи з великими потоками даних, що надходять від сенсорів, зовнішніх API, супутникових систем і метеостанцій у реальному часі. На відміну від традиційних підходів, моделі машинного навчання здатні автоматично виявляти приховані закономірності, враховувати нелінійні залежності між параметрами та адаптуватися до нових умов функціонування системи [26, 30].

Одним із найбільш поширених напрямів застосування машинного навчання в метеорології є прогнозування параметрів погоди. Для цього використовуються як прості регресійні моделі, так і складні нейромережеві архітектури. Зокрема, у

роботі [13] показано можливість підвищення точності прогнозування за рахунок використання гібридної нейронної моделі, яка враховує багатофакторний характер атмосферних процесів. Подібні підходи особливо доцільні у системах моніторингу малих аеродромів, де необхідно отримувати локальні прогнози температури, вологості, тиску, швидкості та напрямку вітру на короткому часовому горизонті.

Для задач, пов'язаних із часовою динамікою метеорологічних параметрів, важливе місце займають рекурентні нейронні мережі, зокрема архітектура LSTM (Long Short-Term Memory). Її перевага полягає у здатності враховувати довгострокові залежності в часових рядах, що є надзвичайно важливим при обробці послідовностей метеоданих [27]. У порівнянні з традиційними методами аналізу часових рядів, LSTM-моделі краще працюють у випадках, коли на значення параметра впливають попередні стани системи, сезонні фактори або приховані тренди. Для систем моніторингу малих аеродромів це відкриває можливість формування прогнозів зміни погодних умов на основі історії локальних спостережень.

Ще одним перспективним напрямом є використання глибинного навчання для обробки багатовимірних метеорологічних даних. Загальні принципи побудови глибинних архітектур, їх здатність до автоматичного вилучення ознак і моделювання складних залежностей детально розглянуті у праці [26, 30]. Для метеорологічних задач це означає, що система може не обмежуватися окремими параметрами, а працювати з їх комбінацією, наприклад одночасно аналізувати температуру, тиск, вологість, швидкість вітру, часові ознаки та просторові характеристики аеродрому.

Для прогнозування просторово-часових погодних процесів, зокрема опадів і локальних атмосферних змін, застосовуються Convolutional LSTM-мережі. У дослідженні [28] показано, що такий підхід ефективно поєднує переваги згорткових нейронних мереж і рекурентних моделей, що дозволяє працювати з даними, які мають як часову, так і просторову структуру. Хоча для малих аеродромів повномасштабне використання подібних моделей може бути обмеженим через обсяг доступних даних, сам принцип їх застосування є важливим

у контексті побудови кіберфізичної системи з елементами інтелектуального аналізу.

Окрім прогнозування, машинне навчання ефективно використовується для виявлення аномалій у метеорологічних даних. Це особливо актуально при інтеграції інформації з різних джерел, коли окремі датчики або зовнішні сервіси можуть передавати некоректні, зашумлені або нестандартні значення. У таких випадках алгоритми навчання можуть виявляти відхилення від типової поведінки системи, визначати підозрілі спостереження та ініціювати додаткову перевірку. Для систем моніторингу малих аеродромів подібний функціонал має практичне значення, оскільки дозволяє зменшити ризик прийняття рішень на основі помилкових даних [25].

Ще одним важливим напрямом є інтелектуальна інтеграція даних з різних джерел. У системах моніторингу погодних умов дані можуть надходити від локальних сенсорів, зовнішніх сервісів, метеорологічних моделей та операторських введень. Методи інтеграції даних дозволяють об'єднувати ці потоки, підвищуючи достовірність кінцевого результату [25]. Якщо поєднати цей підхід із машинним навчанням, система може не просто усереднювати значення, а визначати вагу кожного джерела залежно від його історичної точності, стабільності та відповідності поточним умовам.

У контексті кіберфізичних систем машинне навчання виступає як аналітичний рівень, що з'єднує фізичну підсистему вимірювань із цифровим середовищем прийняття рішень. Поширення технологій Інтернету речей та розподілених сенсорних платформ створює умови для накопичення великих обсягів метеорологічних даних, які стають основою для навчання моделей [22–24]. У такій архітектурі алгоритми машинного навчання дозволяють автоматизувати перехід від простого збору даних до формування рекомендацій, попереджень та адаптивних сценаріїв реагування.

З технічної точки зору практична реалізація методів машинного навчання у метеорологічних системах можлива завдяки використанню сучасних програмних платформ та фреймворків. Зокрема, TensorFlow забезпечує інструментарій для

побудови, навчання та впровадження моделей на різномірних обчислювальних ресурсах [29]. Це важливо для кіберфізичних систем моніторингу, де окремі етапи можуть виконуватись як на серверному рівні, так і на периферійних вузлах обробки даних.

Попри значні переваги, застосування машинного навчання у системах моніторингу метеорологічних параметрів малих аеродромів має і певні обмеження. По-перше, якість роботи моделі безпосередньо залежить від обсягу та репрезентативності навчальних даних. По-друге, для різних параметрів атмосфери можуть знадобитися різні моделі та різні схеми попередньої обробки. По-третє, важливо враховувати пояснюваність результатів, оскільки в авіаційній сфері рішення повинні бути не лише точними, але й обґрунтованими з точки зору безпеки [5, 10, 12, 26].

Аналіз сучасних методів машинного навчання свідчить про їх високу перспективність для систем моніторингу метеорологічних параметрів малих аеродромів. Найбільш доцільними напрямками застосування є прогнозування погодних параметрів, виявлення аномалій, інтеграція різномірних джерел даних та підтримка прийняття рішень у реальному часі. Поєднання цих підходів із технологіями IoT та кіберфізичними системами створює основу для побудови інтелектуальної платформи моніторингу, здатної підвищити надійність і оперативність метеорологічного забезпечення авіаційних операцій.

1.4 Постановка задачі дослідження

Проведений аналіз існуючих підходів до збору, синхронізації та обробки метеорологічних даних показав, що сучасні системи моніторингу характеризуються високим рівнем розвитку, однак мають ряд обмежень, які особливо проявляються у випадку малих аеродромів. Зокрема, класичні метеорологічні рішення орієнтовані переважно на великі аеропорти та потребують значних фінансових і технічних ресурсів для впровадження та обслуговування [1, 4].

Водночас результати аналізу авіаційних подій свідчать про важливість наявності достовірної та своєчасної метеорологічної інформації навіть для об'єктів із невеликою інтенсивністю польотів [6]. Малим аеродромам часто притаманна обмежена кількість вимірювального обладнання, відсутність розвиненої інфраструктури збору даних та залежність від зовнішніх джерел інформації, що знижує точність оцінки погодних умов.

Аналіз сучасних підходів до інтеграції відкритих джерел показав, що використання онлайн-сервісів, супутникових даних та IoT-рішень дозволяє частково компенсувати нестачу локальних вимірювань [9, 22, 24]. Проте при цьому виникають проблеми синхронізації, узгодженості та достовірності даних, що надходять із різних джерел [25, 29]. Це ускладнює процес прийняття рішень та потребує застосування додаткових методів обробки інформації.

З іншого боку, використання методів машинного навчання відкриває нові можливості для підвищення ефективності систем моніторингу. Зокрема, такі методи дозволяють прогнозувати метеорологічні параметри, виявляти аномалії та інтегрувати дані з різних джерел [13, 27, 28, 30-35]. Проте існуючі рішення часто не враховують специфіку малих аеродромів та не інтегровані у єдину кіберфізичну систему, що обмежує їх практичну ефективність [5, 10].

На основі проведеного аналізу можна сформулювати основну науково-практичну проблему: відсутність ефективної кіберфізичної системи моніторингу метеорологічних параметрів для малих аеродромів, яка забезпечує інтеграцію різнорідних джерел даних, їх синхронізацію та інтелектуальну обробку на основі методів машинного навчання.

Для вирішення зазначеної проблеми у даній роботі поставлено наступну мету дослідження: розробка кіберфізичної системи моніторингу метеорологічних параметрів для малих аеродромів, яка забезпечує збір, синхронізацію та аналіз даних із використанням методів машинного навчання.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити такі задачі дослідження:

1. Провести аналіз існуючих методів збору метеорологічних даних та визначити їх особливості у контексті малих аеродромів [1–4].
2. Дослідити підходи до інтеграції та синхронізації даних із різних джерел, включаючи відкриті API та сенсорні мережі [22–25, 35-40].
3. Проаналізувати сучасні методи машинного навчання для обробки та прогнозування метеорологічних параметрів [13, 27, 28, 41-44].
4. Розробити архітектуру кіберфізичної системи моніторингу, що об'єднує фізичний рівень збору даних та цифровий рівень їх обробки.
5. Реалізувати програмні модулі збору, синхронізації та аналізу метеоданих.
6. Провести експериментальну перевірку ефективності запропонованої системи.

1.5 Висновки до розділу 1

У першому розділі виконано комплексний аналіз предметної області моніторингу метеорологічних параметрів для малих аеродромів та обґрунтовано необхідність застосування сучасних інформаційних і інтелектуальних технологій у даній сфері. Встановлено, що метеорологічна інформація є одним із ключових факторів, що визначають безпеку та ефективність авіаційних польотів, особливо на аеродромах із обмеженою інфраструктурою. Недостатність або низька якість метеоданих може призводити до зростання ризиків при виконанні зльоту, посадки та навігації.

Проведений аналіз існуючих технічних рішень для моніторингу метеорологічних параметрів показав, що сучасні системи мають високий рівень точності та функціональності, проте їх використання на малих аеродромах обмежується високою вартістю, складністю впровадження та потребою у спеціалізованому обслуговуванні. У той же час більш доступні рішення не забезпечують необхідної точності та надійності, що зумовлює потребу у створенні гібридних систем, здатних інтегрувати дані з різних джерел.

Аналіз методів збору та синхронізації метеорологічних даних дозволив встановити, що основною проблемою є неоднорідність форматів, різна періодичність оновлення та наявність похибок у даних. Це потребує застосування методів нормалізації, узгодження часових міток та алгоритмів виявлення аномалій. Визначено, що ефективна інтеграція даних можлива лише за умови їх попередньої обробки та перевірки достовірності.

Окрему увагу приділено аналізу методів машинного навчання, які можуть бути застосовані для обробки метеорологічної інформації. Встановлено, що моделі аналізу часових рядів, зокрема рекурентні нейронні мережі, дозволяють здійснювати прогнозування погодних умов та виявляти потенційно небезпечні ситуації. Використання таких підходів відкриває можливості переходу від пасивного моніторингу до інтелектуальної системи підтримки прийняття рішень.

2 РОЗРОБКА АПАРАТНОЇ ЧАСТИНИ КІБЕРФІЗИЧНОЇ СИСТЕМИ МОНІТОРИНГУ МЕТЕОРОЛОГІЧНИХ ПАРАМЕТРІВ ДЛЯ МАЛИХ АЕРОДРОМІВ

2.1 Схеми поєднання компонентів апаратної частини кіберфізичної системи моніторингу метеорологічних параметрів

Апаратна складова кіберфізичної системи моніторингу метеорологічних параметрів відіграє ключову роль у забезпеченні достовірного збору первинної інформації про стан навколишнього середовища на малих аеродромах. Саме на цьому рівні формується базовий інформаційний потік, від якості якого залежить ефективність подальших етапів обробки, аналізу та прогнозування метеорологічних умов.

Схеми поєднання компонентів апаратної частини системи являє собою структуровану сукупність взаємопов'язаних пристроїв, які забезпечують вимірювання, первинну обробку та передачу метеорологічних даних до програмного рівня системи. Основними елементами такої схеми є сенсорні модулі, мікроконтролерні пристрої, комунікаційні модулі, джерела живлення та інтерфейси передачі даних.

На нижньому рівні архітектури розташовані сенсорні пристрої, які здійснюють вимірювання основних метеорологічних параметрів. До таких параметрів належать температура повітря, відносна вологість, атмосферний тиск, швидкість та напрямок вітру, а також кількість та тип опадів. Сенсори можуть бути як інтегрованими багатофункціональними модулями, так і окремими вимірювальними елементами, що підключаються до контролера через стандартні інтерфейси.

Зібрані сенсорами дані передаються до мікроконтролерного блоку, який виконує функції первинної обробки інформації. До таких функцій належать фільтрація шумів, усереднення значень, перевірка коректності показників та формування структурованих пакетів даних. Використання мікроконтролерів

дозволяє зменшити навантаження на центральну систему, а також забезпечити автономність роботи апаратного вузла.

Узагальнена схема поєднання компонентів передбачає послідовний потік даних: від сенсорів – до мікроконтролера – далі до комунікаційного модуля – і, врешті, до серверної частини системи. Така організація забезпечує модульність, що дозволяє легко модернізувати окремі компоненти без впливу на всю систему (рис. 2.1).

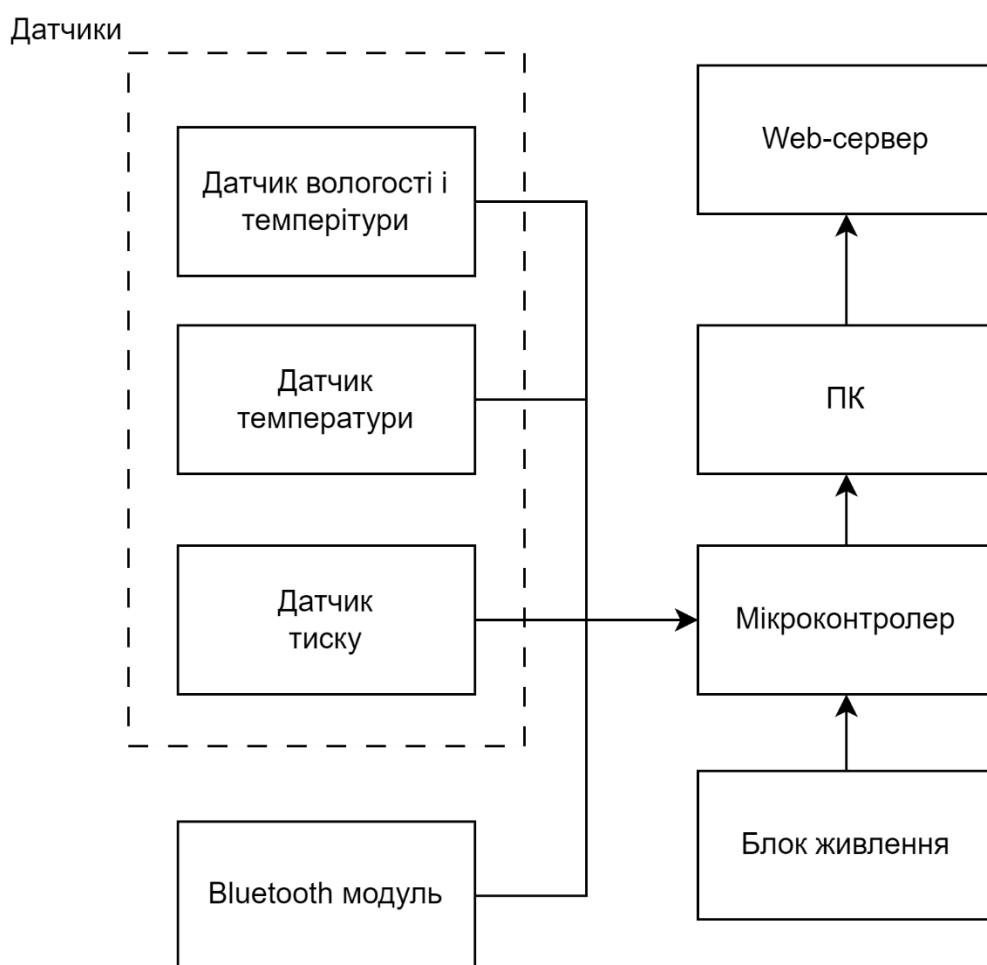


Рисунок 2.1 – Загальна схему власного пристрою для отримання метеорологічних параметрів

Наступним важливим компонентом є комунікаційний модуль, який забезпечує передачу даних до центрального сервера або хмарної інфраструктури. Залежно від умов експлуатації можуть використовуватися різні технології зв'язку,

такі як Wi-Fi, GSM (3G/4G), LoRa або Bluetooth. Вибір конкретної технології визначається радіусом дії, енергоспоживанням, доступністю мережі та вимогами до швидкості передачі даних.

Суттєвим елементом апаратної частини є система живлення. В умовах малих аеродромів, де відсутнє стабільне електропостачання, доцільно використовувати автономні джерела живлення, такі як акумулятори або сонячні панелі. Це забезпечує безперервність роботи системи та підвищує її надійність у польових умовах.

Окрему увагу слід приділити інтерфейсам взаємодії між компонентами. Для підключення сенсорів до мікроконтролера використовуються стандартизовані інтерфейси, такі як I2C, SPI, UART або аналогові входи. Це забезпечує гнучкість системи та можливість масштабування шляхом додавання нових сенсорів або модулів без значної зміни архітектури.

2.2 Підбір компонентів апаратної частини комп'ютеризованої системи моніторингу метеорологічних параметрів

Побудова апаратної частини кіберфізичної системи моніторингу метеорологічних параметрів передбачає обґрунтований вибір електронних компонентів, які забезпечують надійний збір, обробку та передачу даних. Одним із ключових елементів системи виступає мікроконтролерна платформа, яка виконує функції центрального керуючого вузла.

2.2.1 Вибір апаратної платформи

У якості базової апаратної платформи було обрано Arduino Uno – універсальне рішення з відкритою архітектурою, що широко використовується для прототипування та розробки вбудованих систем. Дана платформа характеризується простотою інтеграції, наявністю великої кількості готових бібліотек і підтримкою

широкого спектру периферійних пристроїв, що робить її доцільною для застосування у системах моніторингу.

Основа плати Arduino Uno складає мікроконтролер ATmega328P, який забезпечує виконання програмної логіки системи. Він працює на тактовій частоті 16 МГц, що є достатнім для обробки даних із сенсорів у реальному часі. Наявність як цифрових, так і аналогових входів/виходів дозволяє підключати широкий спектр датчиків без необхідності використання додаткових перетворювачів сигналів.

Стабільність роботи мікроконтролера забезпечується використанням зовнішнього кварцового резонатора, який формує точну тактову частоту. Це особливо важливо для систем, де необхідна синхронізація даних та точність часових інтервалів при опитуванні сенсорів.

Комунікація з персональним комп'ютером або іншими пристроями здійснюється через USB-інтерфейс, який реалізує послідовний зв'язок на основі протоколу UART. Це спрощує процес програмування мікроконтролера, а також дозволяє здійснювати обмін даними в режимі реального часу без використання додаткових адаптерів.

Плата Arduino Uno оснащена розвинутою системою входів і виходів, що включає 14 цифрових портів, частина з яких підтримує широтно-імпульсну модуляцію, а також 6 аналогових входів для роботи з аналоговими сигналами (рис. 2.2).



Рисунок 2.2 – Основні порти плати Arduino Uno

Для забезпечення взаємодії з периферійними пристроями використовуються стандартні інтерфейси передачі даних, зокрема I2C, SPI та UART. Це дозволяє легко інтегрувати датчики температури, вологості, тиску, а також модулі зв'язку без значних змін у схемі пристрою. Використання стандартних інтерфейсів також сприяє масштабованості системи.

Живлення плати може здійснюватися як через USB-порт, так і від зовнішнього джерела напруги в діапазоні 7–12 В. Вбудований стабілізатор напруги забезпечує коректну роботу компонентів незалежно від типу джерела живлення, що особливо важливо при експлуатації пристрою в польових умовах.

Конструктивно плата містить набір роз'ємів для підключення периферійних пристроїв, включаючи сенсори, модулі зв'язку та інші електронні компоненти. Крім того, передбачена можливість використання розширювальних плат – так званих “шілдів”, які дозволяють значно розширити функціональні можливості системи без необхідності її повного перепроектування.

Окрему увагу слід приділити мікроконтролеру ATmega328P-PU як основному обчислювальному елементу системи. Він побудований на RISC-архітектурі, що забезпечує високу швидкодію при виконанні базових операцій. Завдяки 8-бітній архітектурі та оптимізованому набору інструкцій мікроконтролер ефективно справляється із завданнями обробки сенсорних даних (рис. 2.3).

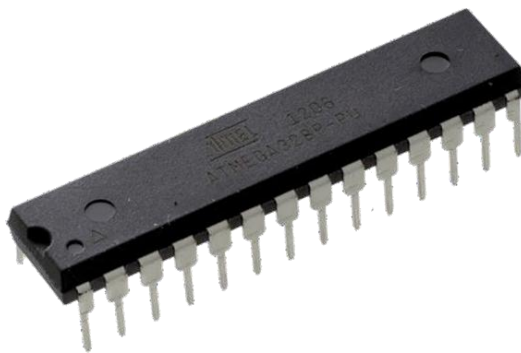


Рисунок 2.3 – Вигляд мікроконтролера ATmega328P-PU

2.2.2 Вибір сенсора вимірювання температури

Для вимірювання температури та відносної вологості у складі кіберфізичної системи було розглянуто популярні сенсори сімейства DHT, зокрема DHT11, DHT21 (AM2301) та DHT22 (AM2302). Дані датчики широко використовуються у вбудованих системах завдяки простоті підключення, цифровому інтерфейсу та достатній точності для більшості прикладних задач.

Порівняльні характеристики наведених сенсорів представлені в таблиці 2.1. Аналіз показує, що кожен із них орієнтований на різні умови експлуатації та рівень вимог до точності вимірювань.

Таблиця 2.1 – Порівняльна таблиця для датчиків вологості з сімейства DHT

Параметр	DHT11	DHT21	DHT22
Діапазон вологості	20% - 90% RH	0% - 100% RH	0% - 100% RH
Точність вимірювання вологості	±5% RH	±2-5% RH	±2% RH
Діапазон температури	0°C - 50°C	-40°C - 80°C	-40°C - 125°C
Точність вимірювання температури	±2°C	±0.5°C	±0.5°C
Інтерфейс	Цифровий (1 дріт)	Цифровий (2 дроти)	Цифровий (2 дроти)
Робоча напруга	3.3V - 5V	3.3V - 5V	3.3V - 5V
Вбудований калібратор	Ні	Так	Так
Вартість	Недорогий	Середній	Високий

Датчик DHT11 є базовим рішенням початкового рівня. Він підтримує обмежений діапазон вимірювання вологості (20–90%) та температури (0–50°C), а також характеризується відносно низькою точністю. Водночас його перевагами є низька вартість, простота використання та мінімальні вимоги до обчислювальних

ресурсів. Це робить його придатним для навчальних проєктів або систем, де висока точність не є критичною.

Модель DHT21 займає проміжне положення між бюджетним і більш точним сегментом. Вона забезпечує повний діапазон вимірювання вологості (0–100%) та значно ширший температурний діапазон (від -40°C до $+80^{\circ}\text{C}$). Крім того, цей датчик має покращену точність вимірювань та вбудовану калібрувальну корекцію, що підвищує стабільність отриманих даних у довготривалій перспективі. Його можна розглядати як компроміс між ціною та якістю.

Найбільш функціональним серед розглянутих є датчик DHT22, який забезпечує максимальний діапазон температур ($-40^{\circ}\text{C} \dots +125^{\circ}\text{C}$) та високу точність як температурних, так і вологісних вимірювань. Завдяки вбудованій калібровці та стабільним характеристикам він підходить для застосувань, де важлива достовірність даних, зокрема у системах моніторингу метеорологічних параметрів. Недоліком цього датчика є вища вартість порівняно з іншими представниками сімейства.

З точки зору інтерфейсу, всі датчики використовують цифрову передачу даних, що спрощує інтеграцію з мікроконтролерами. Відмінності полягають у реалізації протоколу обміну та кількості сигнальних ліній, однак ці нюанси не мають суттєвого впливу на складність реалізації системи.

Важливою характеристикою є також наявність внутрішнього калібрування. У датчиках DHT21 та DHT22 ця функція реалізована апаратно, що дозволяє зменшити похибку вимірювань та підвищити надійність даних без необхідності додаткової програмної корекції.

З урахуванням умов експлуатації на малих аеродромах, де можливі значні коливання температури та вологості, а також підвищені вимоги до точності, найбільш доцільним є використання датчика DHT22 (рис. 2.4), що забезпечує необхідний баланс між точністю, надійністю та функціональністю.

На рисунку 2.5 представлено електричну схему підключення цифрового датчика температури та вологості DHT22 до мікроконтролерної платформи Arduino Uno.

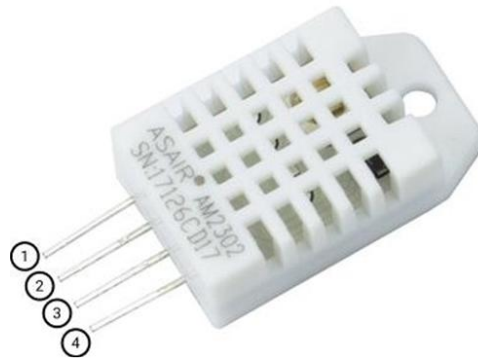


Рисунок 2.4 – Датчик вологості та температури DHT22

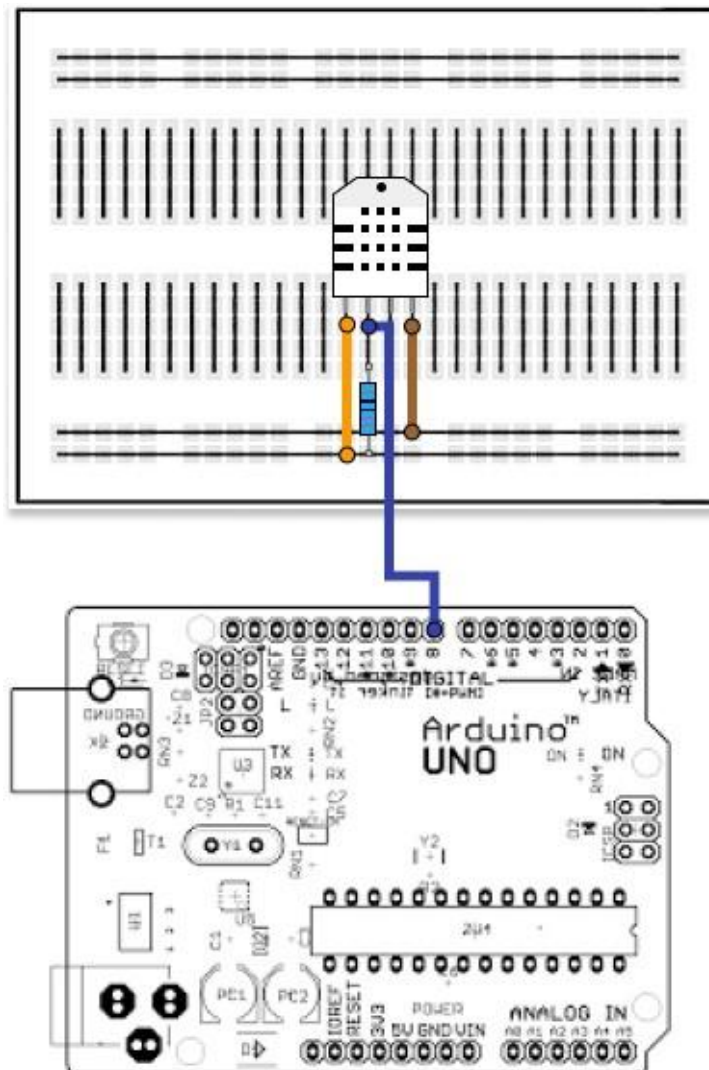


Рисунок 2.5 – Схема підключення датчика DHT22 до плати

Дана схема є типовою для реалізації вимірювальних систем, що використовують цифрові сенсори з однопровідним протоколом передачі даних. Датчик DHT22 має чотири виводи, з яких фактично використовуються три:

живлення (VCC), сигнальний вивід (DATA) та загальний провід (GND). Четвертий контакт не задіюється.

У представленій схемі живлення датчика здійснюється від плати Arduino, де вивід VCC підключений до лінії 5 В (або 3.3 В залежно від конфігурації), а контакт GND – до загальної шини заземлення.

Передача даних між датчиком і мікроконтролером здійснюється через сигнальний провід DATA, який підключається до одного з цифрових входів Arduino (наприклад, D2). Особливістю роботи DHT22 є використання одношинової цифрової лінії, по якій передаються як сигнали ініціалізації, так і самі виміряні значення температури та вологості.

Для коректної роботи датчика в схемі використовується підтягувальний резистор (pull-up resistor), який з'єднує сигнальну лінію DATA з лінією живлення. Як правило, його номінал становить близько 4.7–10 кОм. Наявність цього резистора забезпечує стабільний рівень логічної одиниці на шині та запобігає виникненню паразитних сигналів і помилок передачі даних.

Фізично підключення реалізується за допомогою макетної плати (breadboard), що дозволяє швидко зібрати прототип без пайки. Такий підхід є зручним на етапі тестування та налагодження системи, оскільки забезпечує гнучкість у зміні конфігурації з'єднань.

Принцип роботи схеми полягає в наступному: мікроконтролер періодично ініціює обмін даними, надсилаючи стартовий сигнал на датчик через лінію DATA. У відповідь DHT22 передає пакет даних, який містить інформацію про відносну вологість та температуру у цифровому вигляді.

2.2.3 Вибір сенсора вимірювання атмосферного тиску

У якості сенсора для вимірювання атмосферного тиску в розроблюваній системі було обрано модуль BMP180, який поєднує функції барометра та цифрового термометра. Така інтеграція дозволяє використовувати один

компактний компонент для отримання двох ключових параметрів навколишнього середовища, що є важливим для побудови метеорологічних систем.

Датчик BMP180 забезпечує вимірювання атмосферного тиску з достатньою точністю для практичних застосувань, зокрема для визначення висоти над рівнем моря за барометричною формулою. Це відкриває можливість використання модуля не лише у метеостанціях, але й у навігаційних системах та пристроях контролю висоти. Окрім цього, аналіз змін атмосферного тиску дозволяє робити короткострокові прогнози погодних умов, наприклад, виявляти тенденції до погіршення погоди.

Вбудований температурний сенсор виконує допоміжну функцію – компенсацію похибки вимірювання тиску, а також може використовуватися як окреме джерело температурних даних. Це особливо важливо для забезпечення коректності результатів у змінних умовах середовища.

Завдяки малим габаритам і низькому енергоспоживанню модуль BMP180 добре підходить для використання у вбудованих системах та IoT-рішеннях, де критичними є обмеження по енергоспоживанню та фізичних розмірах пристрою.



Рисунок 2.6 – Датчик тиску BMP180 і стабілізатор напруги XC6206P332MR

До складу модуля входить лінійний стабілізатор напруги XC6206P332MR, який забезпечує формування стабільної напруги живлення на рівні 3,3 В. Це є критично важливим, оскільки сам датчик BMP180 працює у вузькому діапазоні

напруг (1,8–3,6 В) і не може безпосередньо підключатися до стандартних 5-вольтових ліній живлення.

Стабілізатор характеризується низьким власним енергоспоживанням, що дозволяє ефективно використовувати його в автономних системах. Завдяки компактному корпусу він легко інтегрується у друковані плати та модулі.

До основних переваг використання XC6206P332MR належать:

– забезпечення стабільної напруги живлення незалежно від коливань на вході;

– підвищення надійності роботи сенсорів та цифрових інтерфейсів;

– наявність вбудованого захисту від перевантаження та короткого замикання;

– можливість живлення 3,3-вольтових пристроїв від 5-вольтових джерел.

Важливою функцією стабілізатора у даній схемі є також забезпечення коректної роботи цифрових інтерфейсів, зокрема I2C.

Наявність стабілізатора у схемі зумовлена кількома технічними причинами:

1. Узгодження рівнів напруги: більшість сучасних сенсорів працюють на рівні 3,3 В, тоді як мікроконтролерні плати (наприклад Arduino Uno) можуть використовувати 5 В. Стабілізатор забезпечує сумісність між цими рівнями.

2. Захист електронних компонентів: перепади напруги або нестабільне живлення можуть призвести до некоректної роботи або пошкодження сенсора. Використання стабілізатора мінімізує ці ризики.

3. Стабільність передачі даних: цифрові протоколи, зокрема I2C, чутливі до рівня напруги. Стабільне живлення гарантує коректну синхронізацію сигналів.

4. Універсальність живлення: стабілізатор дозволяє використовувати різні джерела живлення без необхідності додаткових перетворювачів.

Підключення датчика BMP180 до мікроконтролера здійснюється за допомогою інтерфейсу I2C, що забезпечує просту та ефективну передачу даних (рис. 2.7).

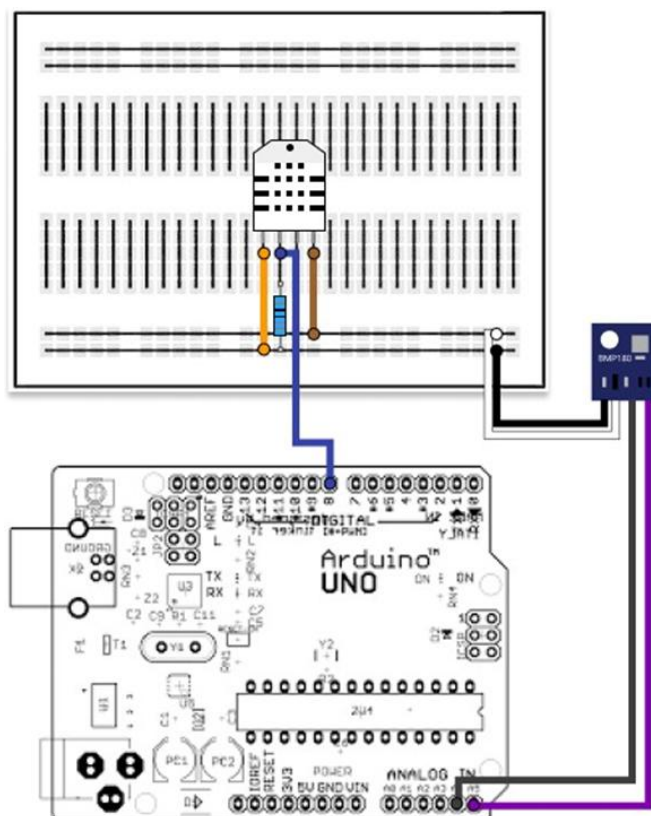


Рисунок 2.7 – Схема підключення датчику тиску

Основні з'єднання виконуються наступним чином:

- VCC (живлення) – підключається до джерела 3,3 В (через стабілізатор);
- GND (земля) – з'єднується із загальною шиною системи;
- SCL (Serial Clock) – підключається до тактового входу мікроконтролера (I2C);
- SDA (Serial Data) – підключається до лінії передачі даних I2C.

Обмін інформацією здійснюється за двопровідною шиною, де мікроконтролер виступає у ролі ведучого пристрою (master), а датчик – у ролі підлеглого (slave). Така організація дозволяє підключати декілька пристроїв до однієї шини без значного ускладнення апаратної частини.

В межах вибору компонентів проведено порівняння датчиків тиску BMP280, BMP180 та BME280 (табл. 2.2).

Таблиця 2.2 – Результати порівняння датчиків тиску

Параметр	BMP180	BMP280	BME280
Тип сенсора	Барометричний	Барометричний (покращений)	Комбінований (барометр + гігрометр)
Вимірювані величини	Тиск, температура	Тиск, температура	Тиск, температура, вологість
Діапазон тиску	300–1100 гПа	300–1100 гПа	300–1100 гПа
Похибка вимірювання тиску	±1 гПа	±1 гПа (краща стабільність)	±1 гПа
Діапазон температур	–40...+85°C	–40...+85°C	–40...+85°C
Похибка температури	±1°C	±1°C	±1°C
Вологість	Відсутня	Відсутня	0–100% RH
Похибка вологості	–	–	±3% RH
Інтерфейси	I2C	I2C, SPI	I2C, SPI
Робоча напруга	1.8–3.6 В	1.8–3.6 В	1.8–3.6 В
Енергоспоживання	Низьке	Дуже низьке	Дуже низьке
Швидкодія	Середня	Висока	Висока
Орієнтовна вартість	Найнижча	Середня	Найвища

2.2.4 Вибір сенсора вимірювання температури

Для вимірювання температури в розроблюваній системі було обрано цифровий сенсор DS18B20, який широко застосовується у вбудованих та кіберфізичних системах завдяки своїй надійності та простоті інтеграції. Його використання є доцільним з огляду на низку технічних переваг.

DS18B20 використовує цифровий протокол обміну даними 1-Wire, що дозволяє підключати датчик до мікроконтролера за допомогою лише одного сигнального проводу. Це значно спрощує апаратну частину системи та зменшує

кількість необхідних з'єднань. Крім того, на одній шині можна розмістити декілька таких датчиків, що розширює можливості масштабування системи.

У типовому робочому діапазоні від -10°C до $+85^{\circ}\text{C}$ похибка становить близько $\pm 0,5^{\circ}\text{C}$, що є прийнятним для більшості задач моніторингу метеорологічних параметрів.

Ще однією перевагою є широкий температурний діапазон експлуатації – від -55°C до $+125^{\circ}\text{C}$. Це дозволяє використовувати датчик у різних кліматичних умовах, включаючи як холодні, так і високотемпературні середовища, що є актуальним для польових умов малих аеродромів.

Особливістю DS18B20 є наявність унікального 64-бітного серійного ідентифікатора, який зберігається у вбудованій пам'яті. Це дозволяє однозначно ідентифікувати кожен датчик у випадку використання декількох пристроїв на одній шині, що є важливим для розподілених систем збору даних.

Також варто відзначити компактні розміри сенсора та можливість виконання у герметичному корпусі (рис. 2.8). Це забезпечує його стійкість до впливу зовнішнього середовища, зокрема підвищеної вологості або пилу, що характерно для умов експлуатації на відкритих територіях.



Рисунок 2.8 – Сенсор температури DS18B20

Підключення датчика DS18B20 до мікроконтролера є простим і не потребує складних апаратних рішень. Основні з'єднання виконуються за трипровідною схемою.

Контакт живлення (VCC) підключається до джерела напруги, яке може знаходитися в межах від 3,0 В до 5,5 В. Це дозволяє використовувати датчик як з 3,3-вольтовими, так і з 5-вольтовими мікроконтролерними платформами.

Контакт GND з'єднується із загальною шиною системи, забезпечуючи коректне функціонування електричного кола.

Сигнальний контакт DQ використовується для передачі даних і підключається до цифрового входу мікроконтролера. Саме через цей вивід здійснюється обмін інформацією за протоколом 1-Wire.

Обов'язковим елементом схеми є підтягувальний резистор номіналом приблизно 4,7 кОм, який встановлюється між лінією DQ та живленням. Його використання забезпечує стабільний логічний рівень сигналу та підвищує надійність передачі даних, запобігаючи виникненню помилок (рис. 2.9).

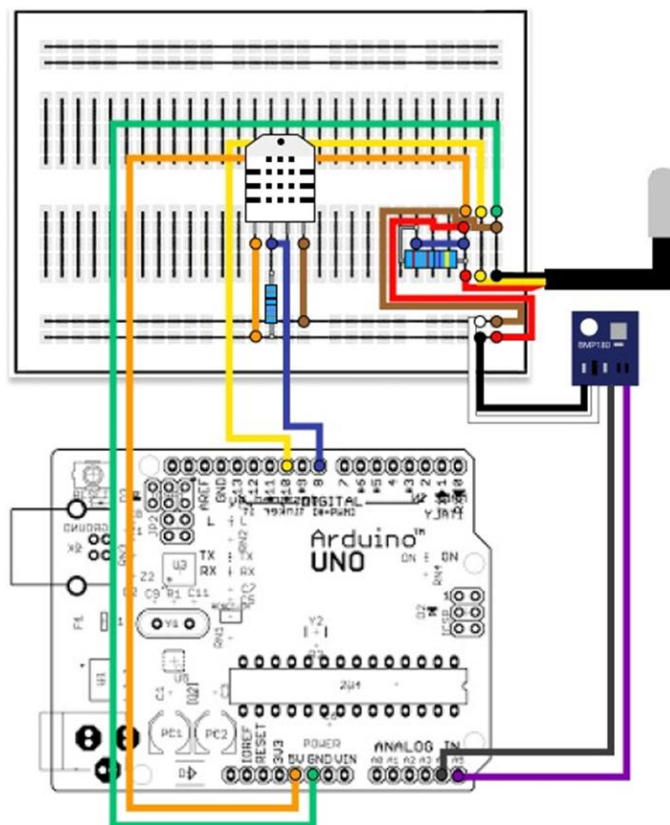


Рисунок 2.9 – Схема підключення датчика температури

Після подачі живлення мікроконтролер ініціює обмін даними з датчиком через лінію DQ. DS18B20 виконує вимірювання температури та передає результат

у цифровому вигляді. Завдяки цифровому формату сигналу відсутня необхідність у використанні аналого-цифрових перетворювачів, що спрощує програмну реалізацію.

2.2.5 Підбір Bluetooth модуля

Для організації бездротової передачі даних у розроблюваній системі було обрано Bluetooth-модуль HC-05, який є одним із найбільш поширених рішень для побудови простих каналів зв'язку між мікроконтролерами та зовнішніми пристроями.

Основною перевагою HC-05 є можливість реалізації бездротової комунікації без використання складної мережевої інфраструктури. Це особливо актуально для систем моніторингу, що працюють у польових умовах або на малих аеродромах, де прокладання кабельних ліній є складним або економічно недоцільним.

Модуль підтримує серійний інтерфейс UART, що значно спрощує інтеграцію з мікроконтролерами. Передача даних здійснюється у прозорому режимі, тобто інформація, яка надходить на один пристрій, безпосередньо передається іншому без додаткової обробки на рівні протоколу. Це дозволяє використовувати HC-05 без складної конфігурації мережевих стеків.

Ще однією важливою перевагою є простота налаштування. Модуль підтримує AT-команди, за допомогою яких можна змінювати параметри роботи, такі як ім'я пристрою, швидкість передачі даних або режим роботи (master/slave). Це забезпечує гнучкість при побудові різних сценаріїв обміну інформацією.

HC-05 забезпечує стабільний зв'язок на відстанях до 10–30 метрів (залежно від умов середовища), що є достатнім для більшості локальних систем збору даних. При цьому він має низьке енергоспоживання, що дозволяє використовувати його у автономних пристроях.

Важливим фактором вибору також є доступність і низька вартість модуля, що робить його привабливим для реалізації прототипів та бюджетних систем бездротового зв'язку.

Таким чином, використання HC-05 є обґрунтованим рішенням для побудови каналу передачі метеорологічних даних від вимірювального вузла до обчислювального пристрою або серверної частини системи.



Рисунок 2.10 – Bluetooth модуль HC-05

Підключення модуля HC-05 до мікроконтролера здійснюється за допомогою стандартного послідовного інтерфейсу UART і не потребує складних апаратних рішень (рис. 2.11).

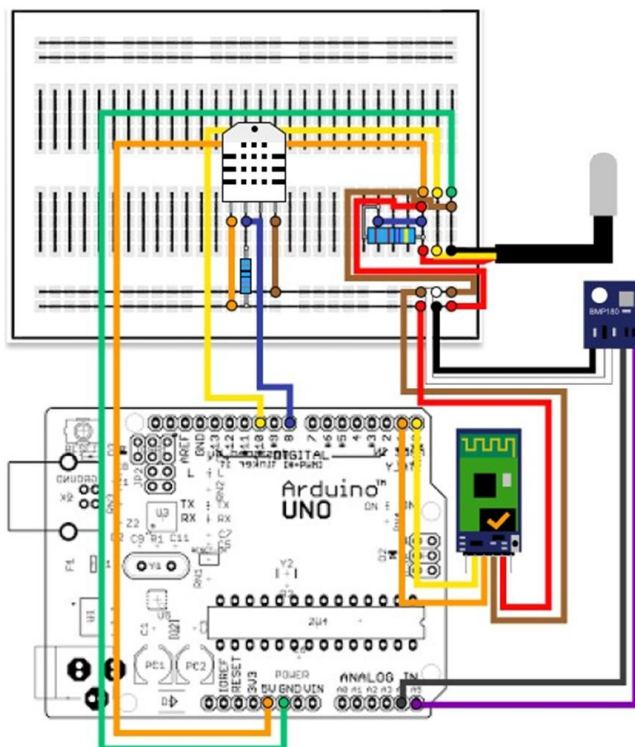


Рисунок 2.11 – Схема підключення Bluetooth модуля HC-05

Живлення модуля (VCC) підключається до джерела напруги в діапазоні 3,6–6 В. У більшості випадків використовується лінія 5 В від мікроконтролерної плати, оскільки модуль має вбудований стабілізатор.

Контакт GND з'єднується із загальною шиною системи для забезпечення коректної роботи електричного кола.

Передача даних здійснюється через два сигнальні контакти:

- вивід TX модуля підключається до входу RX мікроконтролера;
- вивід RX модуля підключається до виходу TX мікроконтролера.

Таке перехресне з'єднання забезпечує двосторонній обмін інформацією між пристроями.

Додатково модуль має керуючий контакт KEY (або EN), який використовується для переведення пристрою у режим конфігурації. У стандартному режимі роботи цей контакт може залишатися непідключеним, однак при необхідності зміни параметрів він підключається до логічного рівня живлення.

При використанні HC-05 у складі кіберфізичної системи необхідно враховувати рівні логічних сигналів. Оскільки мікроконтролер Arduino Uno працює з рівнем 5 В, а RX-вхід модуля розрахований на 3,3 В, доцільно застосовувати дільник напруги або логічний перетворювач рівнів для уникнення пошкодження модуля.

Передача метеорологічних даних здійснюється у вигляді послідовного потоку, який може бути прийнятий комп'ютером або мобільним пристроєм для подальшої обробки, візуалізації або передачі на сервер.

2.2.6 Інтеграція компонентів апаратної частини

Після вибору апаратних компонентів для побудови автоматизованої метеостанції було виконано етап їх практичної інтеграції та тестування на макетній платі. Такий підхід дозволив перевірити сумісність усіх елементів, коректність електричних з'єднань і працездатність системи ще до реалізації фінальної конструкції.

У процесі складання було сформовано прототип вимірювального вузла на базі мікроконтролера, до якого підключено набір сенсорів та комунікаційних модулів. Основною метою цього етапу була перевірка стабільності зчитування даних, правильності їх передачі та відсутності конфліктів між компонентами.

Першим елементом системи виступає комбінований датчик температури та вологості DHT22. Його інтеграція забезпечила можливість отримання базових кліматичних параметрів навколишнього середовища. Під час тестування було підтверджено стабільність показників та достатню точність для задач моніторингу.

Другим важливим компонентом є барометричний датчик BMP180, який використовується для визначення атмосферного тиску. Його робота була перевірена шляхом багаторазового зчитування даних і аналізу їх змін у часі. Отримані результати підтвердили можливість використання сенсора для оцінки погодних тенденцій та непрямих розрахунків висоти.

Додатково до системи було включено цифровий температурний сенсор DS18B20. Його застосування дозволило підвищити надійність температурних вимірювань за рахунок незалежного джерела даних. Порівняння показників із DHT22 показало узгодженість результатів, що свідчить про коректність функціонування обох датчиків.

Для організації передачі даних у бездротовому режимі було використано Bluetooth-модуль HC-05. Після підключення та налаштування модуль забезпечив стабільний обмін інформацією між мікроконтролером і зовнішнім пристроєм. Це дозволило реалізувати передачу метеорологічних параметрів у реальному часі без використання провідних з'єднань (рис. 2.12). Представлена схема ілюструє взаємозв'язки між усіма основними компонентами системи. Центральним елементом є мікроконтролер, який виконує функції збору, обробки та передачі даних. До нього підключені сенсори через відповідні інтерфейси: DHT22 – через цифровий вхід, DS18B20 – за протоколом 1-Wire, BMP180 – через шину I2C.

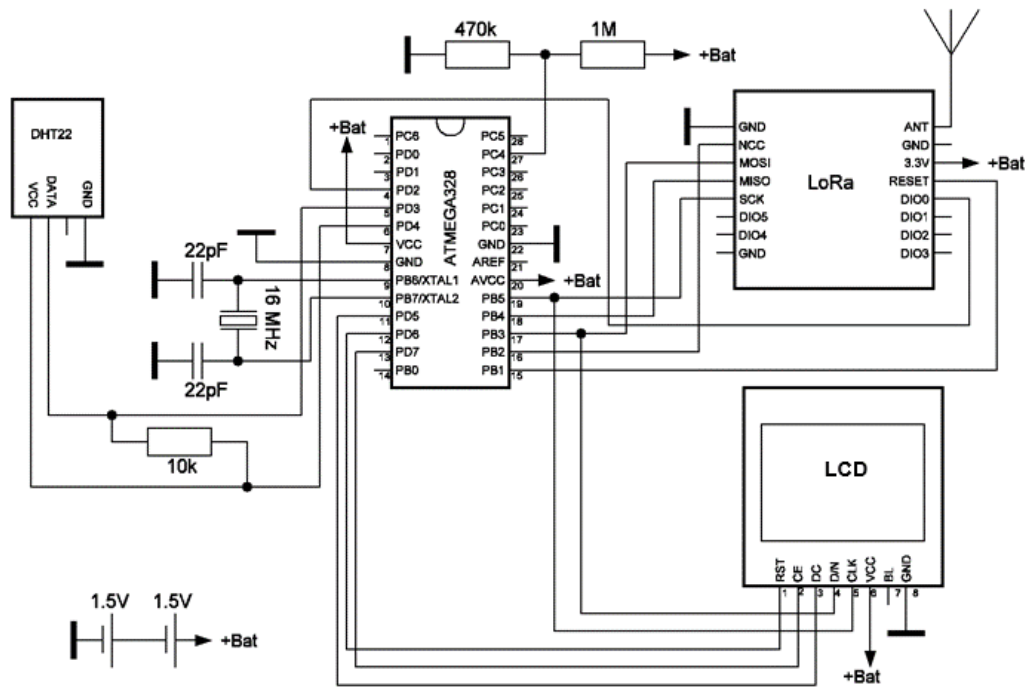


Рисунок 2.12 – Принципова електрична схема системи

Bluetooth-модуль підключено через UART-інтерфейс, що забезпечує серійний обмін даними. Додатково у схемі передбачені елементи стабілізації живлення та формування тактового сигналу.

Після завершення етапу макетування було реалізовано фізичний прототип пристрою. Усі компоненти змонтовано на макетній платі з використанням стандартних з'єднувальних провідників, що дозволило швидко змінювати конфігурацію та проводити експерименти (рис. 2.13).

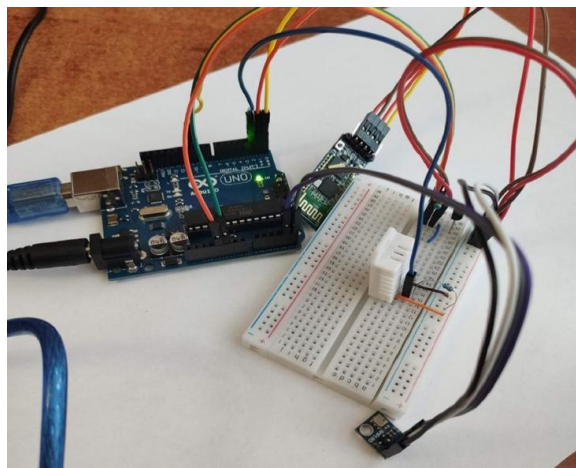


Рисунок 2.13 – Розроблена метеостанція на базі мікроконтролера Arduino Uno

Отриманий експериментальний зразок підтвердив працездатність обраної архітектури. Система здатна здійснювати одночасний збір даних з декількох сенсорів, їх первинну обробку та передачу користувачу.

2.3 Програмування апаратної частини комп'ютеризованої системи моніторингу метеорологічних параметрів

Оскільки розроблена метеостанція включає декілька сенсорних модулів різного типу, програмна частина побудована на основі використання спеціалізованих бібліотек для кожного з них. Такий підхід дозволяє стандартизувати процес взаємодії з датчиками та значно спрощує отримання вимірювальних даних через мікроконтролер Arduino.

Кожен сенсор підключається через відповідний інтерфейс обміну даними. Зокрема, для різних компонентів системи використовуються протоколи I2C, 1-Wire та UART. Це дає можливість ефективно організувати обмін інформацією між мікроконтролером і периферійними пристроями, забезпечуючи надійне зчитування значень температури, вологості, атмосферного тиску та інших параметрів.

Для прикладу, датчик DHT22, який використовується для вимірювання температури та вологості, інтегрується за допомогою відповідної бібліотеки, що надає готові функції для отримання значень. Аналогічно, для інших датчиків застосовуються спеціалізовані програмні модулі, що забезпечують коректну ініціалізацію та обробку даних.

Після підключення всіх компонентів програмне забезпечення організовує періодичне опитування датчиків. Отримані значення можуть бути використані для різних задач, зокрема: відображення на дисплеї, передача через бездротовий канал зв'язку або збереження для подальшого аналізу. Реалізований програмний код наведено в Додатку А.

Розроблене програмне рішення забезпечує збір інформації з чотирьох основних джерел: датчика DHT22 (температура та вологість), датчика BMP180 (атмосферний тиск), цифрового сенсора DS18B20 (температура) та Bluetooth-

модуля HC-05 (передача даних). Архітектура коду побудована таким чином, щоб забезпечити модульність і можливість подальшого розширення.

На початковому етапі відбувається підключення необхідних бібліотек, що відповідають кожному типу сенсора та комунікаційного модуля. Далі визначаються апаратні ресурси мікроконтролера, зокрема піни, до яких підключені датчики та модулі зв'язку.

У функції ініціалізації `setup()` виконується запуск послідовного інтерфейсу для обміну даними, налаштування Bluetooth-з'єднання, а також перевірка доступності сенсорів. Це дозволяє на ранньому етапі виявити можливі помилки підключення або несправності обладнання.

Основна логіка роботи системи реалізована у циклі `loop()`, де відбувається послідовне зчитування даних із кожного сенсора. Зокрема:

- з DHT22 отримуються значення температури та відносної вологості;
- з BMP180 зчитується атмосферний тиск;
- з DS18B20 отримується додаткове значення температури для підвищення достовірності вимірювань.

Після обробки дані передаються через Bluetooth-модуль у вигляді текстового потоку, що дозволяє їх відображення або подальшу обробку на зовнішньому пристрої. Для цього використовуються стандартні функції серійного обміну.

З метою запобігання перевантаженню мікроконтролера та стабілізації роботи системи між циклами зчитування введено затримку, яка визначає період оновлення даних (рис. 2.14).

Окремо реалізовано механізм інтерактивного запиту даних через Bluetooth-з'єднання. У цьому випадку система очікує введення символів від користувача. При надходженні даних виконується їх аналіз, і залежно від отриманої команди здійснюється вибір відповідного сенсора.

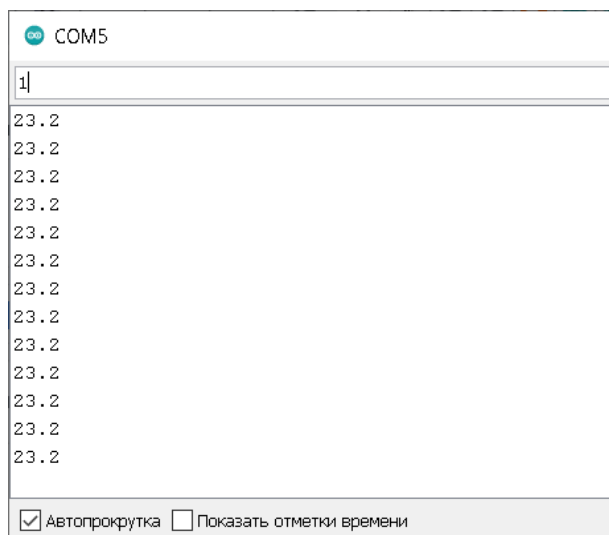


Рисунок 2.14 – Вікно СОМ-порта з даними датчика

Якщо введене значення відповідає одному з підключених датчиків, система виконує зчитування даних лише з цього джерела та виводить результат у монітор порта. У разі некоректного вводу формується повідомлення про помилку, що підвищує зручність використання системи.

У результаті реалізовано програмний модуль, який забезпечує гнучке керування процесом збору метеорологічних даних. Система дозволяє як автоматичне періодичне опитування сенсорів, так і вибіркового доступу до окремих параметрів за запитом користувача через бездротовий інтерфейс.

2.4 Розробка алгоритму опитування датчиків

Для організації зчитування метеорологічних параметрів з підключених сенсорів та передавання отриманих значень на персональний комп'ютер було розроблено алгоритм роботи прошивки апаратної частини системи. Його структура наведена на рисунку 2.15.

Алгоритм роботи прошивки апаратної частини призначений для керування процесом опитування датчиків, перевірки працездатності основних модулів та передавання отриманих метеорологічних параметрів на персональний комп'ютер або зовнішній пристрій через Bluetooth-з'єднання.

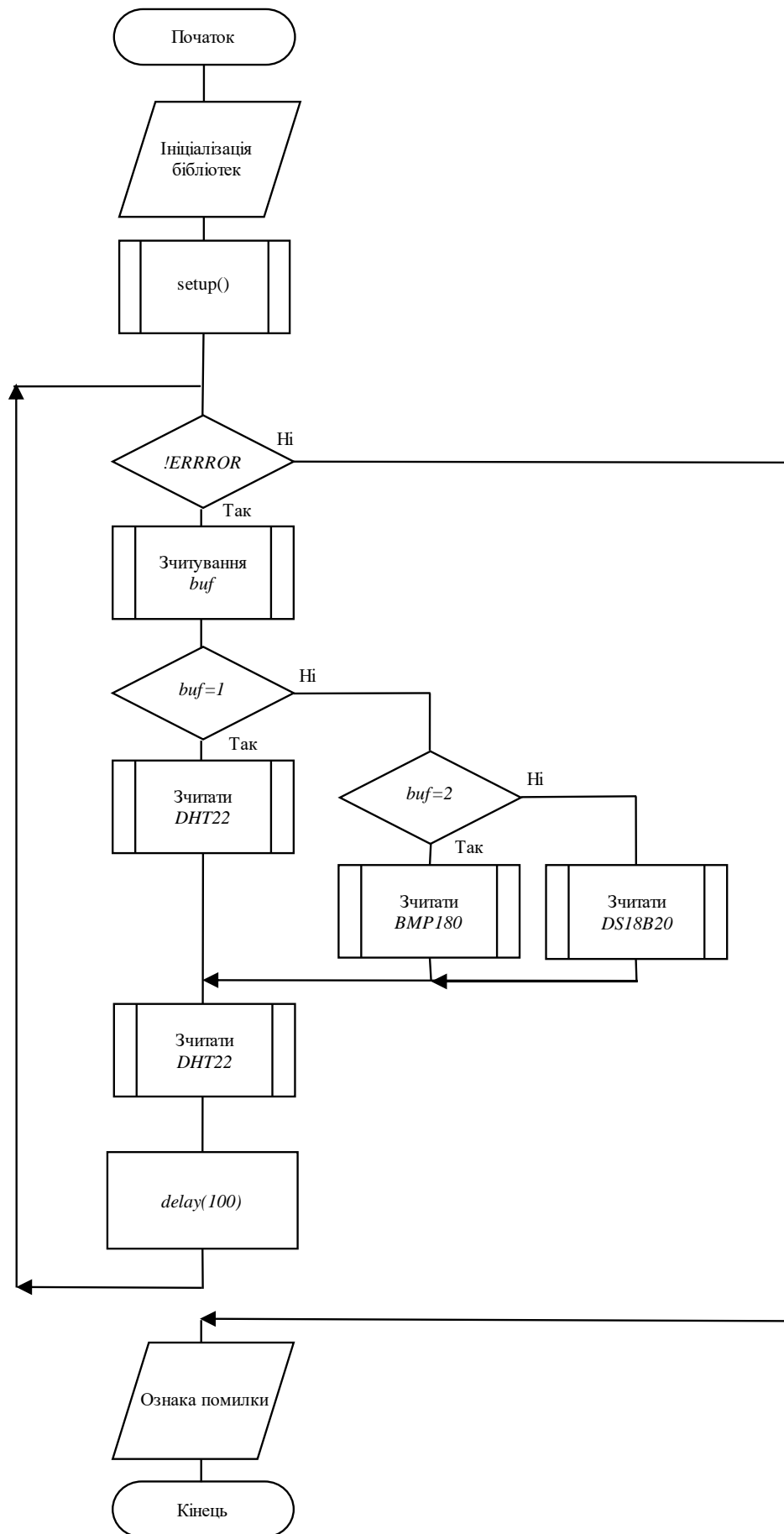


Рисунок 2.15 – Схема алгоритму роботи прошивки апаратної частини

Логіка алгоритму побудована таким чином, щоб забезпечити послідовну ініціалізацію всіх компонентів, перевірку готовності системи до роботи та подальше вибіркоче зчитування даних із потрібного датчика за командою користувача.

На першому етапі відбувається запуск програми та підготовка мікроконтролера до роботи. У програмному коді підключаються бібліотеки, необхідні для взаємодії з датчиками DHT22, BMP180, DS18B20, а також із Bluetooth-модулем HC-05. Після цього визначаються піни, до яких підключені сенсори та модуль зв'язку, створюються програмні об'єкти для роботи з кожним пристроєм. Цей етап є підготовчим, оскільки без правильного визначення бібліотек, пінів та об'єктів мікроконтролер не зможе коректно обмінюватися даними з апаратними компонентами.

Далі виконується блок ініціалізації, який відповідає функції `setup()`. На цьому етапі відкривається серійний порт для зв'язку з персональним комп'ютером, зазвичай зі швидкістю 9600 бод. Паралельно запускається програмний серійний порт для роботи з Bluetooth-модулем. Це дозволяє системі одночасно виводити діагностичні повідомлення у СОМ-порт та приймати команди від зовнішнього пристрою через бездротовий канал.

Після запуску каналів зв'язку відбувається ініціалізація датчиків. Спочатку система активує датчик температури та вологості DHT22, після чого ініціалізується шина 1-Wire для роботи з цифровим датчиком DS18B20. Окремо виконується перевірка доступності датчика атмосферного тиску BMP180, який працює через інтерфейс I2C. Якщо BMP180 не відповідає на запит мікроконтролера, система переходить до гілки обробки помилки. У такому випадку виводиться повідомлення про несправність або відсутність датчика, а подальша робота основного циклу може бути зупинена. Це потрібно для того, щоб уникнути формування некоректних метеорологічних даних.

Після успішної ініціалізації всіх компонентів система переходить до основного циклу `loop()`. Цей цикл виконується безперервно протягом усього часу роботи пристрою. Його основне завдання полягає в очікуванні керуючої команди

від користувача. Команда надходить через Bluetooth-модуль у вигляді окремого символу. Перед зчитуванням система перевіряє, чи є дані у буфері Bluetooth. Якщо буфер порожній, програма не виконує зчитування датчиків, а повертається до початку циклу очікування.

Якщо у буфері Bluetooth є вхідні дані, мікроконтролер зчитує один символ і порівнює його з передбаченими варіантами. У розробленому алгоритмі кожна команда відповідає певному датчику або групі показників.

Команда «1» активує зчитування даних із датчика DHT22. У цьому випадку система отримує два параметри: температуру повітря та відносну вологість. Після зчитування значення перевіряються на коректність, оскільки при помилці обміну DHT22 може повернути некоректне значення. Якщо дані отримані правильно, вони виводяться у СОМ-порт і можуть бути передані через Bluetooth.

Команда «2» відповідає за опитування датчика атмосферного тиску BMP180. Після отримання такої команди мікроконтролер звертається до датчика через шину I2C та отримує значення тиску. За потреби це значення може бути перетворене з паскалів у гектопаскалі, оскільки саме гектопаскалі частіше використовуються у метеорологічних вимірюваннях. Отриманий тиск виводиться у монітор порта та передається зовнішньому пристрою.

Команда «3» запускає роботу з датчиком DS18B20. Для цього мікроконтролер спочатку надсилає команду на виконання вимірювання температури, після чого отримує результат з першого датчика на шині 1-Wire. Це значення може використовуватися як додатковий або контрольний температурний показник. Наявність двох незалежних джерел температури, DHT22 і DS18B20, дозволяє порівнювати їх показники та підвищувати достовірність вимірювань.

Після виконання будь-якої команди алгоритм переходить до короткої затримки. Затримка необхідна для стабілізації роботи мікроконтролера, уникнення надмірного опитування сенсорів та запобігання перевантаженню каналу зв'язку. Особливо це важливо для датчиків, які мають обмеження за частотою опитування, наприклад DHT22.

Після завершення затримки виконання алгоритму повертається до початку основного циклу. Система знову перевіряє Bluetooth-буфер і очікує нову команду від користувача. Такий циклічний принцип роботи дозволяє забезпечити постійну готовність пристрою до опитування сенсорів, не виконуючи зайвих вимірювань без потреби.

У результаті алгоритм забезпечує керовану роботу апаратної частини системи моніторингу. Його перевагою є можливість окремої перевірки кожного датчика, що особливо корисно на етапі налагодження та тестування. Крім того, така структура може бути легко розширена: до неї можна додати нові команди для інших датчиків, команду повного опитування всіх модулів або режим автоматичної періодичної передачі даних.

2.5 Висновки до розділу 2

У другому розділі виконано розробку апаратної складової кіберфізичної системи моніторингу метеорологічних параметрів для малих аеродромів. На основі аналізу вимог до точності, надійності та вартості було обґрунтовано вибір компонентної бази, що забезпечує ефективний збір основних метеорологічних показників.

Як центральний елемент системи обрано мікроконтролер Arduino Uno, який забезпечує достатню обчислювальну потужність, простоту інтеграції та підтримку різних інтерфейсів зв'язку. Використання Bluetooth-модулю HC-05 дозволило реалізувати передачу даних у реальному часі без необхідності використання дротових з'єднань, що є важливим для умов експлуатації на малих аеродромах.

Реалізовано макетний зразок пристрою, на якому виконано підключення всіх сенсорів і модулів, а також проведено перевірку їх працездатності, та розроблено алгоритм роботи прошивки, який забезпечує ініціалізацію системи, перевірку справності компонентів, опитування датчиків та передачу результатів на зовнішній пристрій.

3 РОЗРОБКА ПРОГРАМНОЇ ЧАСТИНИ КІБЕРФІЗИЧНОЇ СИСТЕМИ МОНІТОРИНГУ МЕТЕОРОЛОГІЧНИХ ПАРАМЕТРІВ ДЛЯ МАЛИХ АЕРОДРОМІВ

3.1 Дерево функцій системи моніторингу метеорологічних даних на малих аеродромах

Формування функціональної структури системи є одним із ключових етапів її проектування, оскільки дозволяє системно описати всі задачі, які повинна виконувати розроблена інформаційна технологія. Для цього використовується підхід декомпозиції, за якого складна система розбивається на взаємопов'язані підсистеми та функціональні модулі. Такий підхід значно спрощує подальшу розробку, тестування та масштабування системи.

На рисунку 3.1 представлено дерево функцій кіберфізичної системи моніторингу метеорологічних параметрів для малих аеродромів.

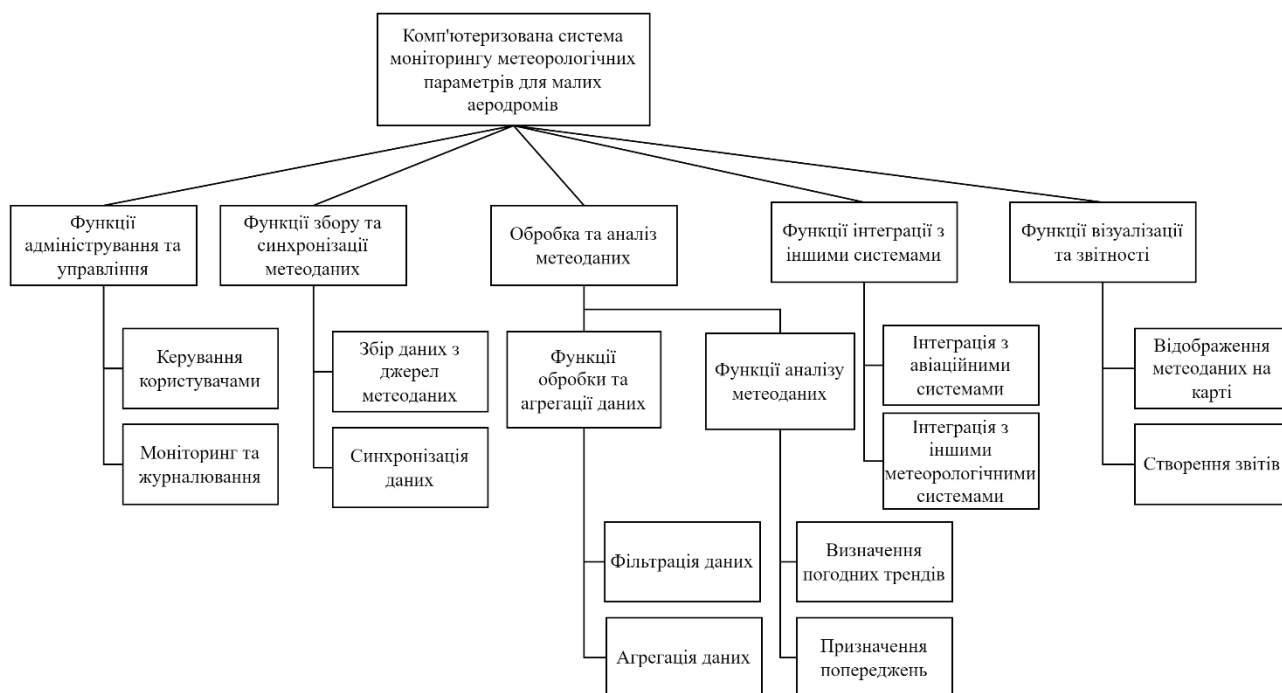


Рисунок 3.1 – Дерево функцій системи моніторингу метеорологічних параметрів для малих аеродромів

На верхньому рівні система охоплює п'ять основних функціональних напрямів: адміністрування, збір і синхронізацію даних, обробку та аналіз, інтеграцію з іншими системами, а також візуалізацію і звітність. Кожен із цих напрямів деталізується у вигляді підфункцій, що дозволяє чітко визначити їх роль у загальній архітектурі.

До основних функціональних вимог системи належать такі:

1. Збір метеорологічної інформації. Система повинна забезпечувати отримання даних із різних джерел, включаючи локальні сенсорні модулі, зовнішні веб-сервіси та спеціалізовані метеорологічні платформи. Передбачається підтримка як потокового збору інформації в режимі реального часу, так і доступу до історичних даних для подальшого аналізу.

2. Синхронізація та інтеграція даних. Оскільки інформація надходить із кількох джерел, система має забезпечувати їх узгодження у часі та форматі. Це включає нормалізацію значень, усунення дублювання та об'єднання даних у єдину структуру для подальшої обробки.

3. Обробка та аналітика метеоданих. Отримані значення повинні проходити етап попередньої обробки, що включає фільтрацію шумів, перевірку достовірності та калібрування. Далі виконується агрегування даних і їх аналіз, включаючи визначення погодних умов, виявлення відхилень та формування аналітичних показників. У розширеному варіанті система може застосовувати методи машинного навчання для прогнозування змін метеопараметрів.

4. Вибір і керування джерелами даних. Система повинна підтримувати механізми адаптивного вибору джерел залежно від їх доступності, точності та актуальності. Це дозволяє підвищити надійність отриманої інформації та мінімізувати вплив некоректних даних.

5. Підтримка прийняття рішень. На основі оброблених метеорологічних даних система формує рекомендації та попередження для користувачів. Це може включати сигналізацію про небезпечні погодні умови, що впливають на безпеку польотів, а також автоматичну генерацію повідомлень.

6. Інтерфейс взаємодії з користувачем. Система повинна мати зручний веб-інтерфейс або клієнтський додаток, що дозволяє користувачам отримувати актуальну інформацію, переглядати історичні дані, а також формувати звіти. Важливою вимогою є адаптивність інтерфейсу для різних типів пристроїв.

7. Візуалізація та звітність. Отримані дані мають відображатися у вигляді графіків, таблиць або картографічних представлень. Система повинна підтримувати формування звітів для подальшого використання в аналітичній діяльності або прийнятті управлінських рішень.

Методологія функціонального моделювання IDEF0 є ефективним інструментом для формалізованого опису складних інформаційних систем, оскільки дозволяє представити їх у вигляді взаємопов'язаних функціональних блоків із чітко визначеними потоками даних, керуючими впливами та механізмами реалізації. Використання цього підходу у межах розроблюваної системи дає змогу структурувати процеси обробки метеорологічної інформації, а також наочно відобразити взаємодію між окремими підсистемами та користувачами (рис. 3.2).

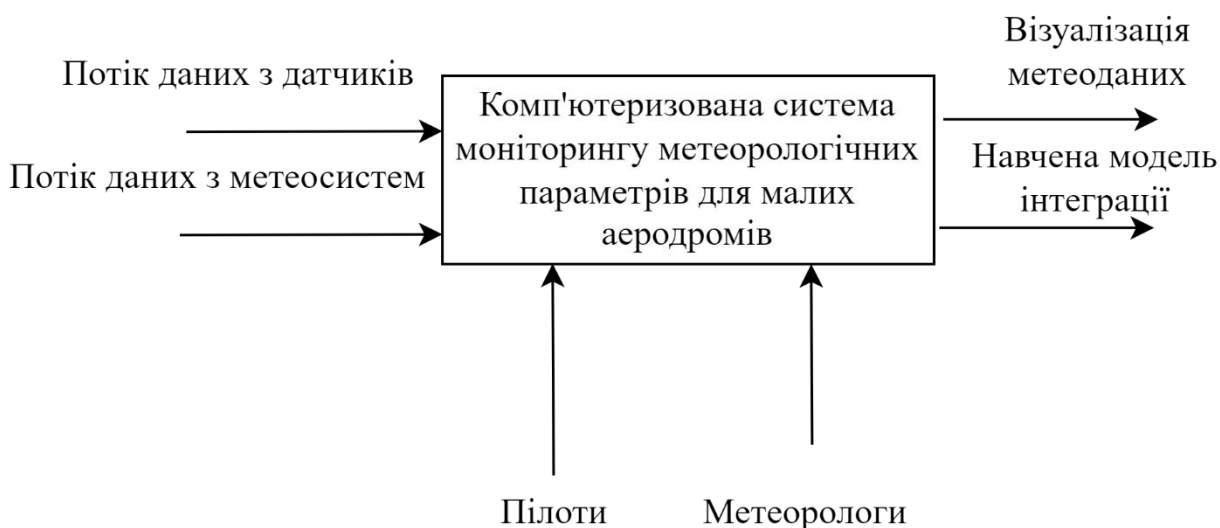


Рисунок 3.2 – Представлення комп'ютеризованої системи моніторингу метеорологічних параметрів для малих аеродромів у форматі IDEF0

На контекстній діаграмі (рівень А-0) система розглядається як єдиний функціональний блок, на вхід якого надходять потоки даних від сенсорних пристроїв та зовнішніх метеорологічних сервісів. У якості керуючих впливів виступають дії користувачів системи, зокрема пілотів і метеорологів, які визначають режими роботи та параметри аналізу. Результатом функціонування системи є оброблені та інтегровані метеорологічні дані, що подаються у вигляді візуалізації або використовуються для формування управлінських рішень.

Подальша деталізація системи здійснюється на рівні А0, де основна функція декомпонується на кілька підпроцесів (рис. 3.3).

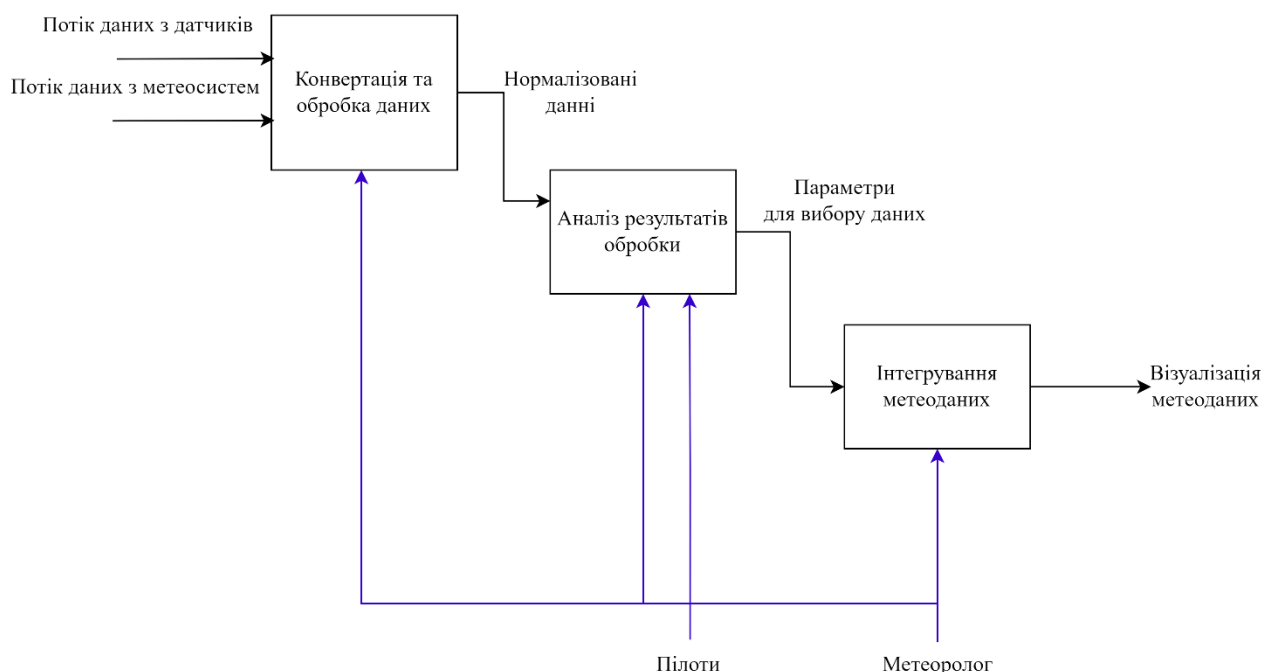


Рисунок 3.3 – Представлення процесу візуалізації метеорологічних даних у форматі IDEF0

У межах цього підпроцесу на вхід надходять сирі або попередньо оброблені дані з різних джерел. На першому етапі виконується їх конвертація та нормалізація, що забезпечує приведення значень до єдиного формату. Далі здійснюється аналітична обробка, яка включає перевірку коректності, фільтрацію шумів і формування узагальнених показників. На основі отриманих результатів формується структура даних, придатна для інтеграції, після чого виконується

передача до підсистеми візуалізації. Користувачі (пілоти, метеорологи) можуть впливати на процес через налаштування параметрів відображення, що виступають у ролі керуючих сигналів.

Окремий функціональний блок системи, представлений на рисунку 3.4, описує процес навчання моделі інтеграції метеорологічних даних.

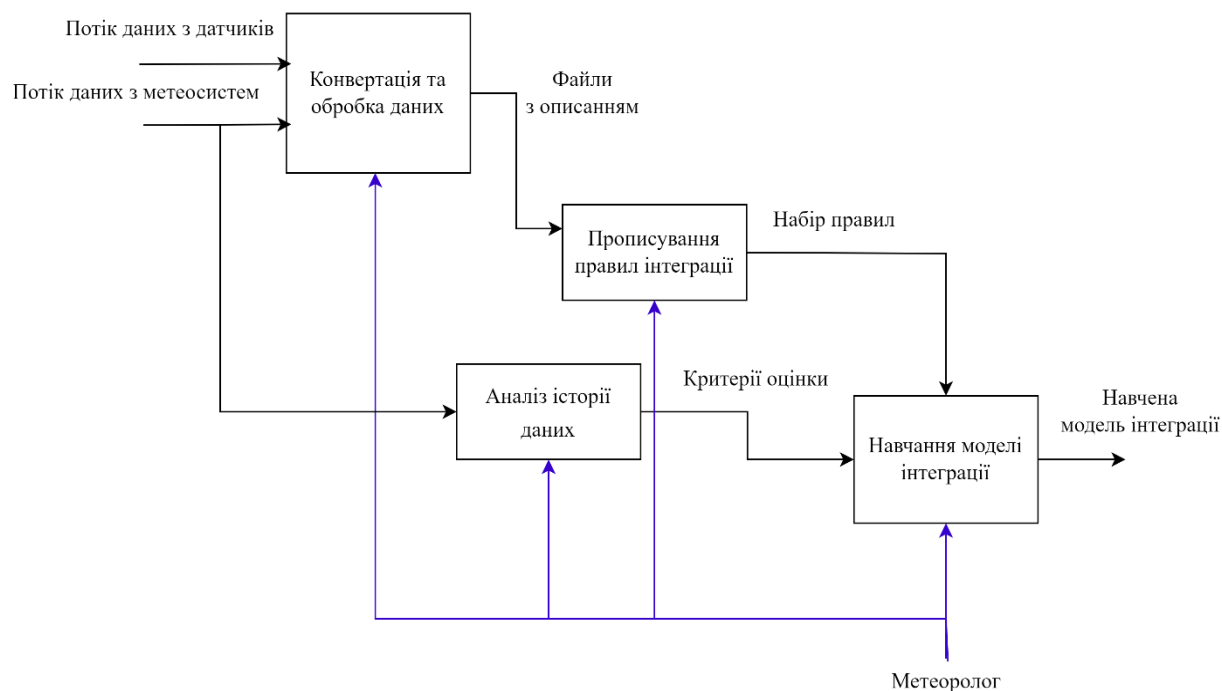


Рисунок 3.4 – Представлення навчання моделі інтеграції в форматі моделі IDEF0

Даний підпроцес включає більш складну логіку, пов'язану із застосуванням методів машинного навчання. На вхід модуля надходять як поточні потоки даних із сенсорів та зовнішніх джерел, так і накопичені історичні дані. Першим етапом є попередня обробка та підготовка даних, після чого виконується аналіз історичних значень з метою виявлення закономірностей. На основі цього формуються правила інтеграції, які враховують особливості різних джерел інформації.

Далі виконується процес навчання моделі інтеграції, який передбачає адаптацію параметрів обраної нейромережевої моделі до специфіки метеорологічних даних. У результаті формується навчена модель, яка здатна більш точно об'єднувати дані з різних джерел, враховуючи їх достовірність, часову

узгодженість та взаємозв'язки між параметрами. Керуючий вплив у цьому процесі здійснюється з боку експертів (метеорологів), які можуть коригувати параметри навчання або задавати додаткові умови.

3.2 Моделювання процесів в комп'ютеризованій системі моніторингу метеорологічних параметрів для малих аеродромів

Моделювання процесів функціонування системи моніторингу метеорологічних параметрів є важливим етапом її проектування, оскільки дозволяє формалізувати взаємодію користувачів із системою та визначити основні сценарії її використання. Для цього застосовано UML-діаграми, зокрема діаграму варіантів використання, яка наочно відображає ролі користувачів та їх функціональні можливості.

У процесі розробки системи було визначено ключових користувачів (акторів), які взаємодіють із нею, а також набір основних функцій, що реалізуються у межах програмного забезпечення (рис. 3.5).

До основних акторів системи належать:

1. Пілот – користувач, який використовує систему для отримання оперативної інформації про метеорологічні умови. Його основна задача полягає в оцінюванні погодної ситуації перед виконанням польоту та під час нього. Це дозволяє своєчасно коригувати маршрут або приймати рішення щодо безпеки польоту.

2. Метеоролог – спеціаліст, який відповідає за аналіз, перевірку та інтерпретацію метеорологічних даних. Він взаємодіє із системою для перегляду інформації, її уточнення, а також формування звітів і рекомендацій.

3. Адміністратор системи – користувач із розширеними правами доступу, який забезпечує налаштування, супровід та контроль функціонування системи. До його обов'язків входить керування користувачами, конфігурація параметрів системи та підтримка її працездатності.

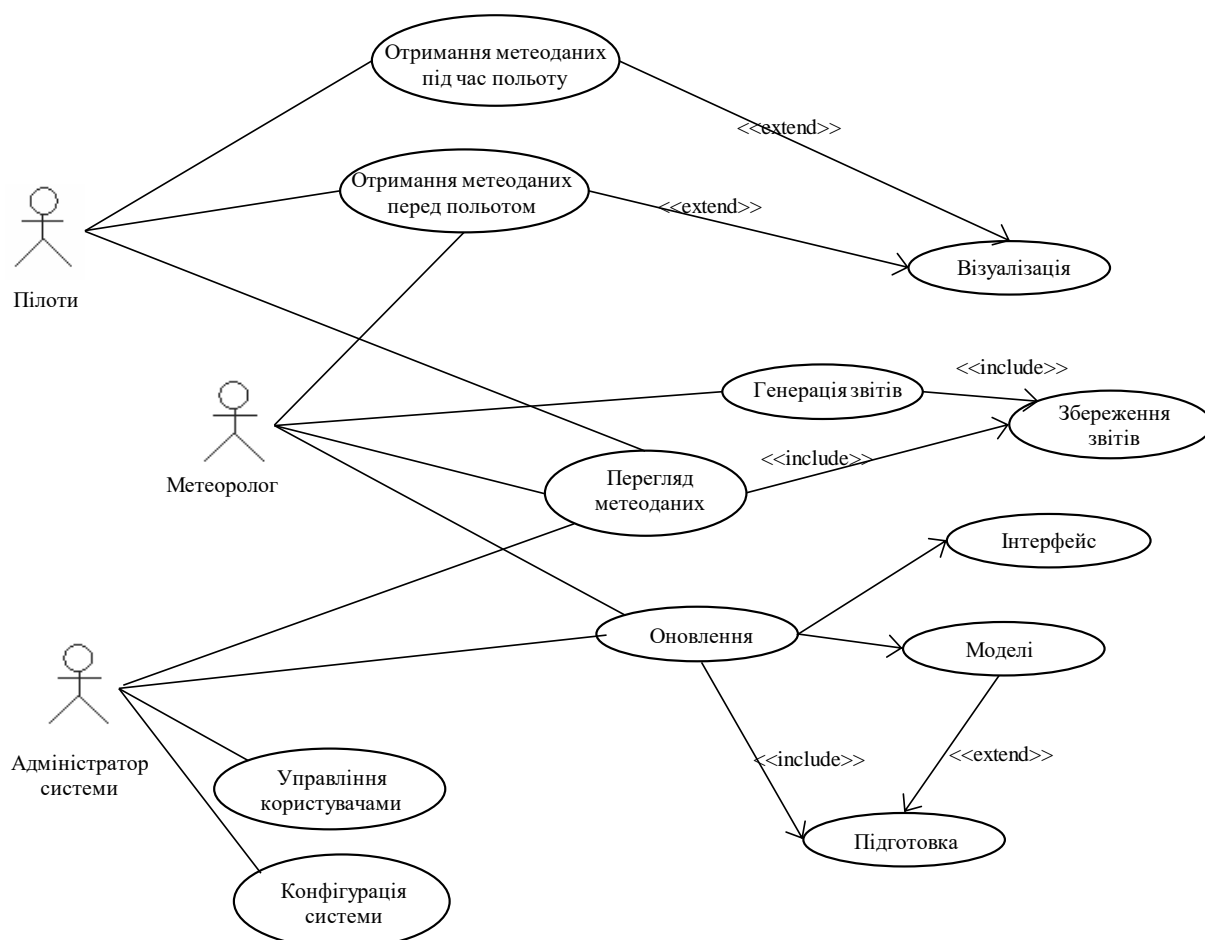


Рисунок 3.5 – Діаграма варіантів використання комп'ютеризованої системи моніторингу метеорологічних параметрів

До основних акторів системи належать:

1. Пілот – користувач, який використовує систему для отримання оперативної інформації про метеорологічні умови. Його основна задача полягає в оцінюванні погодної ситуації перед виконанням польоту та під час нього. Це дозволяє своєчасно коригувати маршрут або приймати рішення щодо безпеки польоту.

2. Метеоролог – спеціаліст, який відповідає за аналіз, перевірку та інтерпретацію метеорологічних даних. Він взаємодіє із системою для перегляду інформації, її уточнення, а також формування звітів і рекомендацій.

3. Адміністратор системи – користувач із розширеними правами доступу, який забезпечує налаштування, супровід та контроль функціонування системи. До

його обов'язків входить керування користувачами, конфігурація параметрів системи та підтримка її працездатності.

У межах системи реалізовано низку функціональних сценаріїв (use cases), які визначають можливості кожного з акторів:

– функція перегляду метеорологічної інформації, що доступна всім користувачам і дозволяє отримувати актуальні дані про погодні умови на аеродромах. Дані можуть відображатися у вигляді таблиць, графіків або інших візуальних форм;

– функція оновлення метеорологічних даних, що метеоролог має можливість ініціювати для отримання даних із зовнішніх джерел або сенсорних систем;

– функція отримання даних перед польотом, що доступна пілотам для оцінки погодних умов перед виконанням польоту;

– функція отримання даних під час польоту забезпечує доступ до оновлених метеорологічних параметрів у процесі польоту, що дає змогу оперативно реагувати на зміну погодних умов.

– функція формування звітів дозволяє метеорологу генерувати аналітичні звіти на основі накопичених даних. Такі звіти можуть використовуватися для аналізу погодних тенденцій або підготовки рекомендацій.

– функція конфігурування системи дозволяє адміністратору виконувати налаштування параметрів системи (визначення джерел даних, періодичність їх оновлення, параметри інтеграції та обробки тощо);

– функція керування користувачами дозволяє адміністратору створювати нові облікові записи, змінювати права доступу та видаляти користувачів, забезпечуючи контроль доступу до системи.

– функція інтеграції та обробка даних включає процеси обробки, фільтрації та інтеграції метеорологічної інформації, що забезпечує її узгодженість та готовність до використання.

Особливістю представленої діаграми є наявність взаємозв'язків типу «include» та «extend», які відображають залежності між сценаріями. Наприклад, процес перегляду даних включає їх попередню обробку, а формування звітів

базується на функціях збереження та аналізу інформації. Це дозволяє більш точно відобразити логіку функціонування системи.

Наведені сценарії використання узагальнюють основні можливості системи моніторингу метеорологічних параметрів та демонструють, яким чином різні категорії користувачів взаємодіють із програмними модулями. Вони дозволяють визначити межі відповідальності кожного актора, описати логіку доступу до функцій системи та сформувати основу для подальшого моделювання внутрішніх процесів.

На рисунку 3.6 представлено діаграму активностей, яка описує процес оновлення метеорологічних даних у системі.

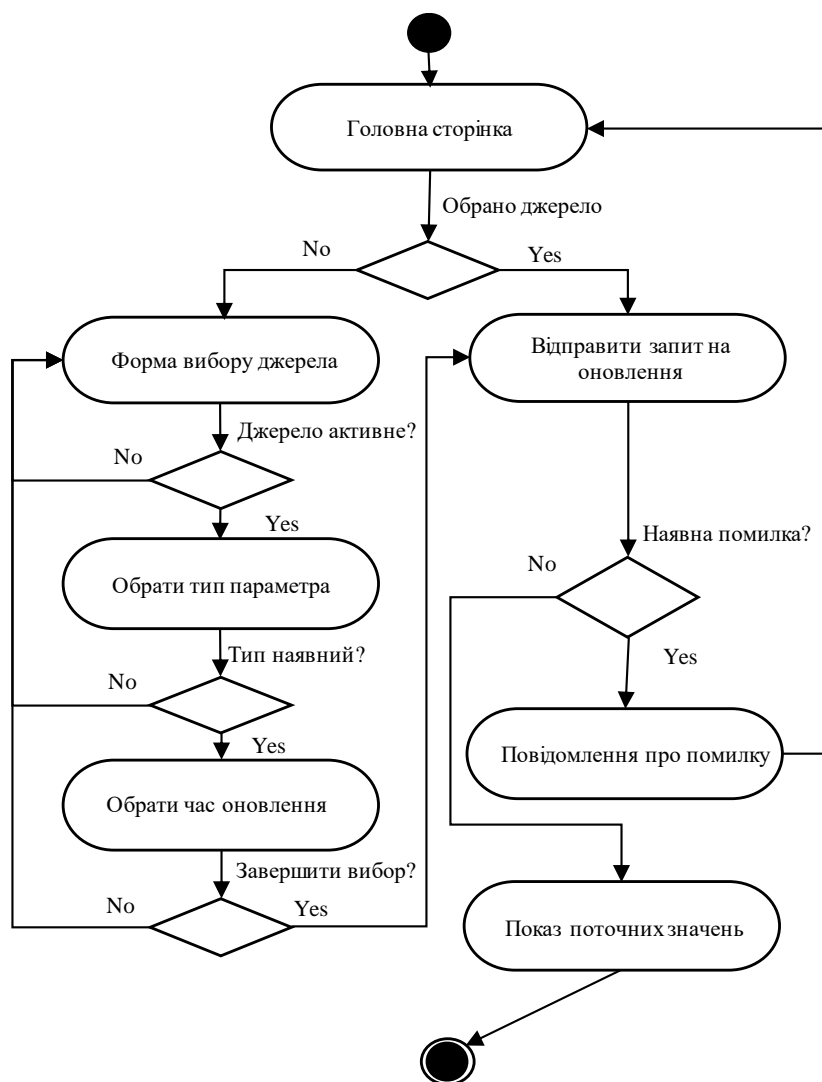


Рисунок 3.6 – Активності при оновленні метеорологічних даних

Робота сценарію починається з переходу користувача на головну сторінку, після чого система перевіряє, чи обрано джерело даних. Якщо джерело не вибрано, користувачу пропонується форма вибору джерела. Далі система перевіряє його доступність, дозволяє обрати необхідні параметри та підтвердити оновлення. Якщо джерело активне і вибір завершено, формується запит на оновлення даних.

Після надсилання запиту система перевіряє, чи виникла помилка під час отримання або обробки інформації. У разі помилки користувач отримує відповідне повідомлення і може повернутися до вибору параметрів або джерела. Якщо помилки не виявлено, система відображає поточні значення метеорологічних параметрів. Така логіка дозволяє зробити процес оновлення керованим, контрольованим і стійким до ситуацій, коли зовнішнє джерело є недоступним або повертає некоректні дані.

Діаграма послідовності на рисунку 3.7 деталізує обмін повідомленнями між основними учасниками процесу запиту метеорологічних даних. У сценарії беруть участь користувач, інтерфейс системи, серверна частина та база даних. Спочатку користувач заповнює форму запиту, обираючи необхідні параметри або джерело метеоданих. Після цього інтерфейс передає запит на сервер для подальшої обробки.

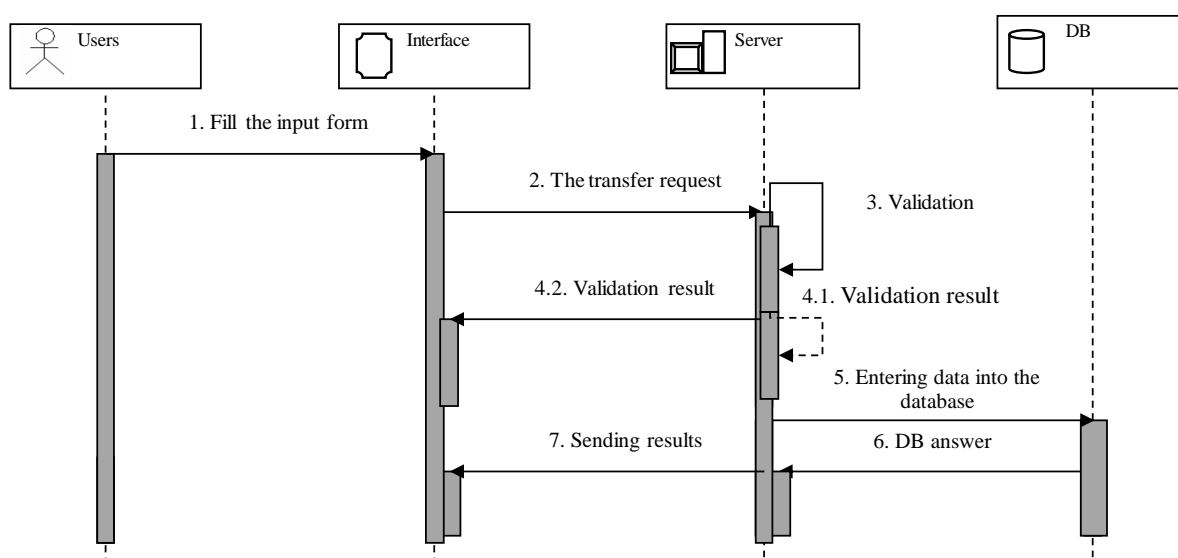


Рисунок 3.7 – Діаграма послідовності дій при запиті метеорологічних даних

Сервер виконує перевірку коректності отриманих даних, зокрема контролює заповнення обов'язкових полів, допустимість параметрів і права доступу користувача. Результат перевірки повертається до інтерфейсу. Якщо дані пройшли валідацію, сервер формує запит до бази даних або передає інформацію для запису. База даних повертає відповідь про успішність операції, після чого сервер надсилає кінцевий результат користувачу. Така послідовність забезпечує контрольовану передачу інформації, зменшує ризик помилок і дозволяє відстежувати всі етапи обробки запиту.

На рисунку 3.8 наведено діаграму розгортання, яка демонструє фізичну організацію програмних компонентів системи. Користувач працює із системою через робочу станцію або персональний комп'ютер, на якому використовується веб-браузер. Взаємодія з сервером здійснюється через HTTP або HTTPS-з'єднання, що забезпечує доступ до веб-інтерфейсу системи.

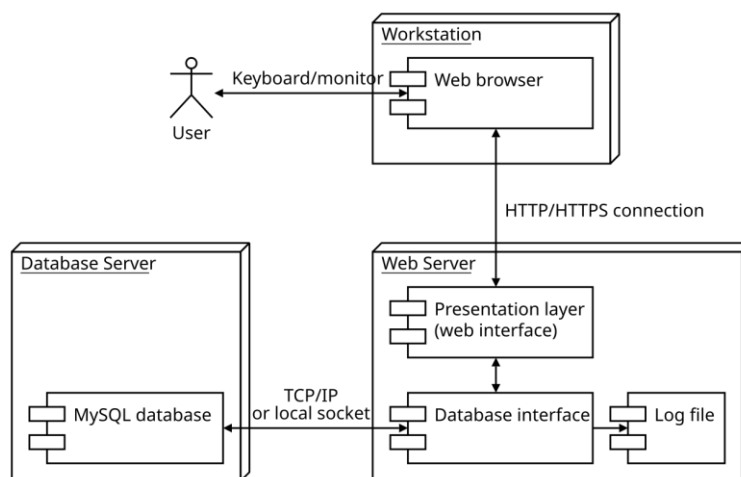


Рисунок 3.8 – Діаграма розгортання системи

Серверна частина містить рівень представлення, який відповідає за формування веб-інтерфейсу, а також інтерфейс взаємодії з базою даних. Окремо передбачено ведення журналу подій, що дозволяє фіксувати помилки, дії користувачів і службові повідомлення. База даних розміщується на окремому сервері або у виділеному серверному середовищі та взаємодіє з веб-сервером через TCP/IP або локальний сокет. Така архітектура забезпечує розділення

користувацького, серверного та інформаційного рівнів, що позитивно впливає на масштабованість і супровід системи.

Діаграма компонентів, подана на рисунку 3.9, відображає внутрішню структуру програмної частини системи та взаємозв'язки між її модулями. Центральним елементом є онлайн система інтеграції метеоданих, яка складається з двох основних підсистем: модуля клієнтської частини та модуля інтеграції метеоданих.

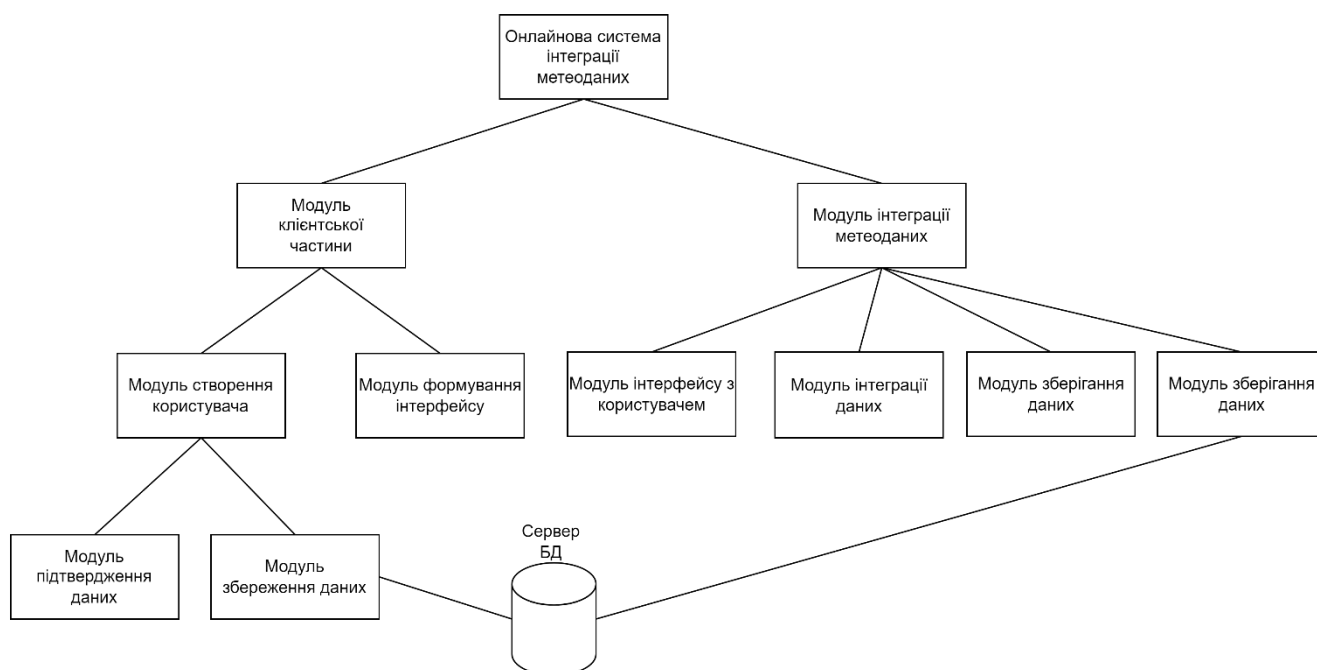


Рисунок 3.9 – Діаграма компонентів

Модуль клієнтської частини відповідає за створення користувацького інтерфейсу, відображення даних та взаємодію користувача із системою. До нього входять компоненти формування інтерфейсу, представлення даних і збереження результатів користувацьких дій. Модуль інтеграції метеоданих забезпечує приймання, обробку та зберігання інформації, отриманої з різних джерел. Він включає інтерфейс користувача, модуль інтеграції даних, модуль зберігання та компонент взаємодії зі сховищем SQL.

3.3 Вибір програмних інструментів для реалізації основних модулів серверної частини системи

Одним із ключових етапів проєктування серверної частини кіберфізичної системи моніторингу метеорологічних параметрів є обґрунтований вибір мови програмування. Від цього вибору залежить продуктивність обробки запитів, можливість інтеграції з зовнішніми сервісами, зручність розробки та подальша підтримка системи.

З урахуванням поставлених задач, пов'язаних із прийманням даних від клієнтських пристроїв, обробкою метеорологічної інформації, інтеграцією з API зовнішніх сервісів та формуванням відповідей у режимі реального часу, було обрано мову програмування PHP.

Вибір PHP обумовлений, перш за все, її орієнтацією на розробку серверних веб-застосунків. Вона забезпечує ефективну обробку HTTP-запитів, має вбудовані засоби роботи з мережевими протоколами та дозволяє швидко реалізувати серверну логіку без необхідності використання додаткових складних інструментів. Це є важливим для систем, що функціонують у режимі постійної взаємодії з користувачем.

Ще одним важливим фактором є широка підтримка PHP на більшості хостингових платформ. Це дозволяє без суттєвих витрат розгорнути систему на стандартних серверах та забезпечувати її доступність через мережу Інтернет. Крім того, PHP добре інтегрується з веб-серверами, такими як Apache або Nginx, що забезпечує стабільну роботу системи під навантаженням.

Не менш важливою є наявність великої кількості бібліотек і готових рішень для роботи з форматами даних (JSON, XML), що активно використовуються при інтеграції з метеорологічними сервісами. Це значно спрощує реалізацію механізмів отримання та обробки зовнішніх даних.

У контексті розроблюваної системи PHP також використовується як інструмент організації серверного API, через який здійснюється обмін даними між апаратною частиною (мікроконтролерними пристроями), базою даних та

клієнтським інтерфейсом. Це дозволяє централізувати обробку інформації та забезпечити узгодженість даних у системі.

Додатковою перевагою є простота реалізації механізмів безпеки, зокрема обробки користувачьких запитів, перевірки вхідних даних та організації доступу до ресурсів системи. Це є критично важливим для систем, що працюють із потенційно чутливою інформацією.

Програмна частина кіберфізичної системи моніторингу метеорологічних параметрів побудована за модульним принципом, що дозволяє розділити складну функціональність на окремі логічні компоненти. Такий підхід забезпечує гнучкість, масштабованість і спрощує подальшу модернізацію системи. Кожен модуль виконує визначений набір задач і взаємодіє з іншими компонентами через стандартизовані інтерфейси.

До складу системи входять наступні програмні модулі:

– модуль отримання метеорологічної інформації, що відповідає за збір даних із різнорідних джерел, включаючи локальні сенсори, автоматизовані метеостанції, віддалені сервери та відкриті метеорологічні сервіси. Він підтримує як роботу в режимі реального часу, так і доступ до архівних записів, що дозволяє використовувати систему не лише для оперативного моніторингу, але й для ретроспективного аналізу;

– модуль попередньої обробки даних, де отримані значення проходять етап перевірки та підготовки, який включає виявлення помилок, фільтрацію шумів, усунення пропусків і перетворення у єдиний формат. Також на цьому етапі можуть виконуватись розрахунки похідних показників, наприклад індексів комфортності або оцінки погодних ризиків;

– модуль збереження інформації, що забезпечує організацію структурованого сховища даних, з можливістю накопичення великих обсягів інформації за тривалий період часу. Реалізовано механізми швидкого доступу до даних, формування вибірок та підтримки історичних архівів, що є критично важливим для аналізу динаміки метеорологічних процесів;

– модуль інтеграції з зовнішніми системами, що забезпечує обмін даними з іншими інформаційними системами, зокрема авіаційними сервісами, системами управління польотами та зовнішніми метеорологічними платформами. Для цього використовуються стандартизовані протоколи та формати, що гарантує сумісність і коректність обміну інформацією;

– модуль візуалізації та аналітики, що реалізує користувацький інтерфейс системи та відповідає за відображення метеорологічних параметрів у зручній формі. Дані можуть подаватися у вигляді графіків, таблиць, карт або інтерактивних панелей. Користувач отримує можливість швидко оцінити поточну ситуацію та проаналізувати зміни погодних умов;

– модуль архівування та резервування даних, що використовується для забезпечення надійності системи і довготривалого зберігання інформації та регулярного резервного копіювання;

– модуль керування доступом та захисту інформації, що відповідає за ідентифікацію користувачів, перевірку їх прав доступу та захист даних від несанкціонованого використання;

– модуль сповіщення та реагування, що надає системі здатність автоматично формувати повідомлення у випадку виявлення небезпечних погодних умов або відхилень параметрів від допустимих значень;

– модуль моніторингу стану системи, що забезпечує контроль працездатності всіх компонентів, відстежує помилки та дозволяє адміністраторам своєчасно реагувати на збої. Передбачена можливість віддаленого керування параметрами системи;

– модуль інтелектуального аналізу метеорологічних даних, що реалізує елементи інтелектуальної обробки інформації на основі сучасних методів аналізу даних. Він виконує дослідження часових рядів, виявляє закономірності змін параметрів та дозволяє прогнозувати їх поведінку на короткий період.

Узгоджена робота зазначених модулів формує цілісну програмну систему, яка забезпечує ефективний збір, обробку, збереження та аналіз метеорологічних

даних. Завдяки модульній архітектурі система легко адаптується до нових вимог і може бути розширена додатковими функціями без суттєвих змін базової структури.

Використання програмних інтерфейсів прикладного рівня (API) для отримання та оновлення метеорологічної інформації є важливим елементом функціонування системи моніторингу погодних умов на малих аеродромах. Саме завдяки інтеграції із зовнішніми сервісами забезпечується доступ до актуальних, різнопланових і географічно розподілених даних, що значно підвищує достовірність оцінки метеорологічної ситуації.

Одним із джерел даних є сервіс OpenWeatherMap, який надає доступ до широкого спектра метеорологічної інформації. Через відповідний API система може отримувати як поточні погодні параметри, так і прогностичні значення або архівні записи. Важливою перевагою цього сервісу є наявність безкоштовного тарифного плану, що дозволяє використовувати його в системах із обмеженим фінансуванням, зокрема для малих аеродромів.

Іншим джерелом є Weatherstack, який відзначається простотою інтеграції та зручністю використання. Його API має зрозумілу структуру запитів і відповідей, що спрощує розробку серверної частини системи. Крім того, цей сервіс також пропонує базовий безкоштовний доступ із певними обмеженнями, що робить його доцільним для використання як допоміжного джерела інформації.

Більш професійним і точним джерелом даних виступає сервіс AccuWeather, який спеціалізується на високоточних прогнозах, у тому числі для авіаційної сфери. Його API дозволяє отримувати детальні метеорологічні показники з високим рівнем достовірності, однак зазвичай доступ до нього є платним, що необхідно враховувати при проєктуванні системи.

Незалежно від обраного сервісу, робота з API передбачає обробку відповідей у стандартних форматах обміну даними, переважно JSON. Система повинна забезпечувати коректний парсинг отриманої інформації, обробку можливих помилок (наприклад, відсутність відповіді або перевищення ліміту запитів), а також використання ключів доступу для автентифікації запитів (рис. 3.10).

```
▼ coord:
  lon:      30.8923
  lat:      50.3402
▼ weather:
  ▼ 0:
    id:      804
    main:    "Clouds"
    description: "overcast clouds"
    icon:    "04d"
    base:    "stations"
▼ main:
  temp:      274.06
  feels_like: 269.28
  temp_min:  271.88
  temp_max:  274.06
  pressure:  1021
  humidity:  92
  sea_level: 1021
  grnd_level: 1005
  visibility: 10000
▼ wind:
  speed:     5.17
  deg:       308
  gust:      10.72
▼ clouds:
  all:       85
  dt:        1702632015
▼ sys:
  type:      2
  id:        2082717
  country:   "UA"
  sunrise:   1702619380
  sunset:    1702648389
  timezone:  7200
  id:        711660
  name:      "Boryspil"
  cod:       200
```

Рисунок 3.10 – Формат JSON метеорологічних даних

Особливу увагу приділено обмеженням, які накладають API-сервіси, зокрема кількості запитів у певний проміжок часу. Для забезпечення стабільної роботи системи необхідно оптимізувати частоту звернень до зовнішніх джерел і реалізувати механізми кешування даних.

Для підвищення достовірності метеорологічної інформації у системі реалізовано підхід, при якому дані отримуються одночасно з декількох незалежних сервісів. Кожне джерело опитується окремо, після чого результати агрегуються. На основі отриманих значень обчислюється узагальнений показник, наприклад середнє значення параметра.

Додатково впроваджено механізм контролю відхилень. Для цього визначається допустимий поріг різниці між значеннями окремого джерела та інтегрованим результатом. Якщо показник одного із сервісів суттєво відрізняється від інших і перевищує встановлений поріг, таке джерело може бути позначене як ненадійне у поточний момент. Це дозволяє підвищити точність кінцевих даних та зменшити вплив помилок або неточностей окремих сервісів.

Використання відсотків для визначення середнього відхилення (AVG_Err) може бути зручним підходом, особливо коли маємо справу з різними типами даних і сервісами з різною точністю. Цей підхід забезпечує більшу гнучкість і дозволяє легше адаптувати точність до різних умов (рис. 3.11).

Для реалізації інтелектуального аналізу та прогнозування метеорологічних параметрів у системі було використано сучасні засоби машинного навчання, реалізовані через платформу Ollama, яка забезпечує виконання попередньо навчених моделей штучного інтелекту [46-50].

У межах даного підходу використовується модель належить до класу глибинних нейронних мереж для обробки часових рядів та аналітики даних, що дозволяє працювати з послідовностями метеорологічних параметрів та виявляти залежності між ними. Застосування такого типу моделей є доцільним у задачах прогнозування, де важливо враховувати зміну параметрів у часі [51-55].

Використання платформи Ollama обумовлено її здатністю забезпечувати локальне виконання моделей без необхідності постійного звернення до зовнішніх хмарних сервісів.

Обраний підхід дозволяє реалізувати такі функціональні можливості:

- аналіз історичних метеорологічних даних з метою виявлення закономірностей їх зміни [56, 57];
- формування короткострокових прогнозів параметрів навколишнього середовища [58, 59];
- виявлення аномальних значень, що можуть свідчити про нестандартні або потенційно небезпечні погодні умови [60, 61, 62];
- узагальнення інформації з різних джерел із урахуванням їх надійності [63].

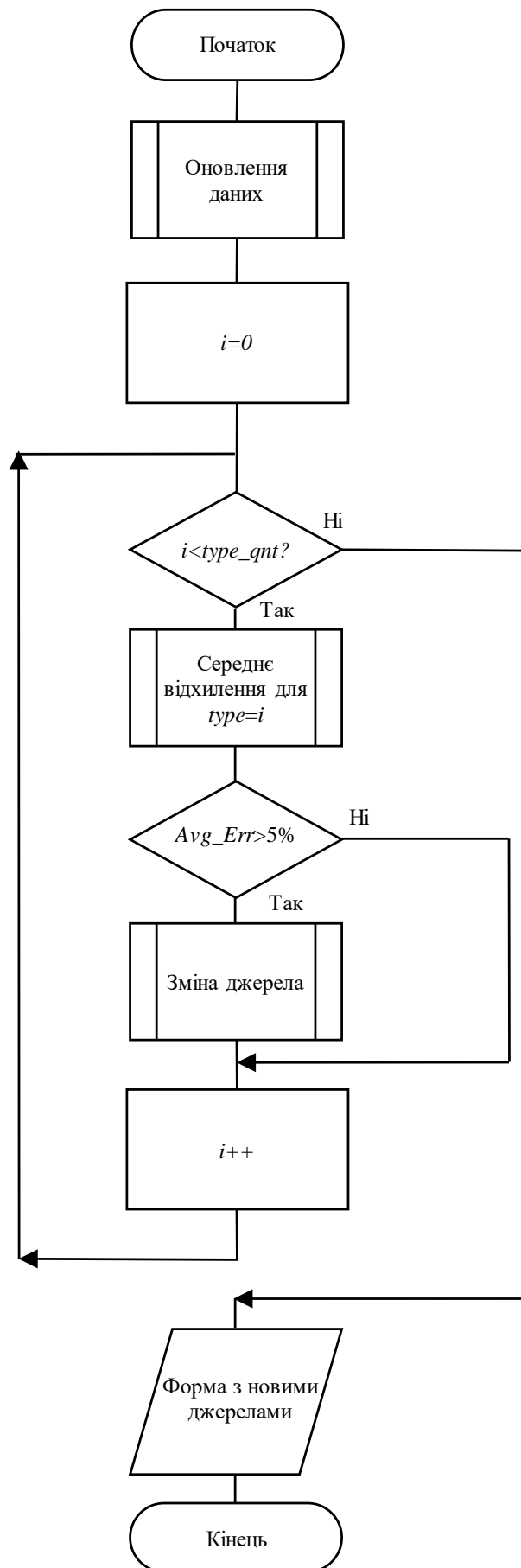


Рисунок 3.11 – Схема алгоритму зміни джерел метеорологічних даних

У системі модель використовує такі вхідні дані:

- значення температури, вологості та атмосферного тиску;
- часові мітки вимірювань;
- похідні параметри (швидкість зміни показників).

Перед подачею на вхід моделі дані проходять етап нормалізації та формування часових вікон, що дозволяє забезпечити стабільність прогнозування.

Модель попередньо навчена на відкритих наборах метеорологічних даних і використовується у системі для виконання інференсу. Вона формує прогнозні значення метеорологічних параметрів на короткий часовий інтервал, що є критично важливим для задач моніторингу умов на малих аеродромах.

3.4 Висновки до розділу 3

У третьому розділі виконано розробку програмної частини кіберфізичної системи моніторингу метеорологічних параметрів для малих аеродромів. Проведене проектування дозволило сформувавши цілісну архітектуру програмного забезпечення, яка охоплює процеси збору, обробки, зберігання та візуалізації метеорологічних даних.

У ході роботи було реалізовано набір функціональних модулів, кожен із яких виконує окрему роль у забезпеченні роботи системи. Деталізований опис цих компонентів дозволив визначити їх взаємозв'язки, оптимізувати процеси обміну даними та забезпечити узгодженість функціонування всієї системи в цілому. Особливу роль відіграє розроблена структура бази даних, яка забезпечує ефективне накопичення як поточних, так і історичних значень метеорологічних параметрів, що є необхідним для подальшого аналізу [64-68].

Значну увагу приділено модулю інтеграції із зовнішніми джерелами інформації. Реалізований механізм опитування API дозволяє отримувати метеорологічні дані з різних сервісів, виконувати їх узгодження та формувати узагальнені значення, що підвищує достовірність інформації та забезпечує стійкість системи до похибок окремих джерел.

4 ОПИС І ТЕСТУВАННЯ РОЗРОБЛЕНОЇ СИСТЕМИ

4.1 Опис розробленого інтерфейсу

На рисунку 4.1 представлено початковий інтерфейс системи, який забезпечує користувачу вибір між процедурами входу до системи або створення нового облікового запису. Такий підхід дозволяє реалізувати розгалуження сценаріїв взаємодії залежно від статусу користувача.

Система відслідковування
метеоданих аеродромів

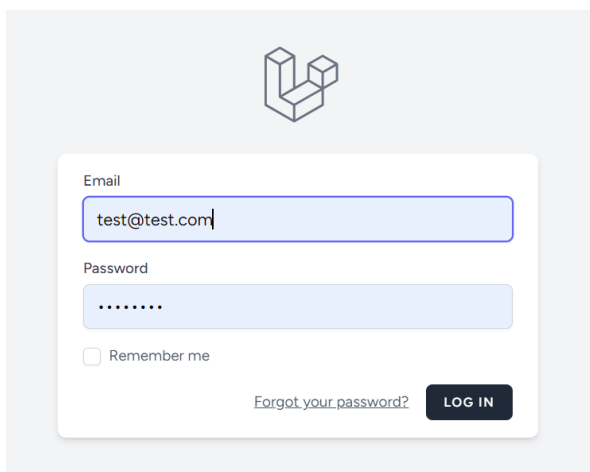
ЛОГІН

РЕЄСТРАЦІЯ



Рисунок 4.1 – Вікно входу в систему

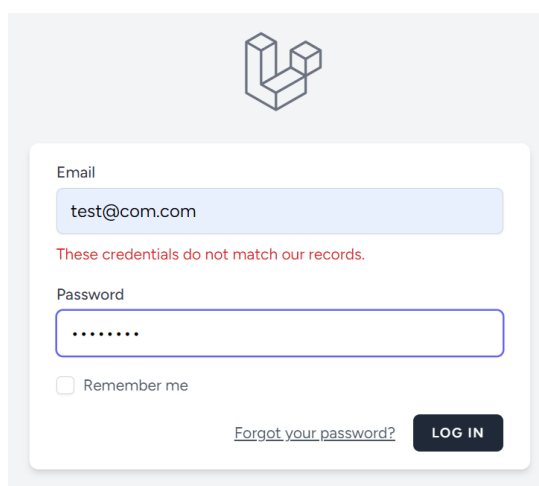
Вікно автентифікації користувача (рис. 4.2) реалізує стандартний механізм перевірки доступу до системи та містить базові елементи взаємодії. До основних складових цього інтерфейсу належать поле введення електронної адреси або логіна, поле введення пароля, а також керуючі елементи для ініціалізації процесу входу. Додатково передбачено функціональність відновлення доступу у випадку втрати пароля та можливість переходу до процедури реєстрації нового користувача.



The image shows a login interface. At the top center is a logo consisting of three stacked cubes. Below it is a white form with a light blue border. The form contains the following elements: an 'Email' label above a text input field with 'test@test.com'; a 'Password' label above a text input field with masked characters '.....'; a checkbox labeled 'Remember me'; a link 'Forgot your password?'; and a dark blue button with the text 'LOG IN'.

Рисунок 4.2 – Вікно авторизації

У разі введення некоректних облікових даних система генерує відповідне повідомлення про помилку (рис. 4.3), що дозволяє користувачу оперативно виявити проблему та повторити спробу входу. Така поведінка системи відповідає принципам інформаційної безпеки та підвищує зручність використання [69].



The image shows the same login interface as Figure 4.2, but with an error message. The 'Email' field now contains 'test@com.com'. Below the email field, a red error message reads 'These credentials do not match our records.' The 'Password' field remains masked with '.....'. The 'Remember me' checkbox, 'Forgot your password?' link, and 'LOG IN' button are still present.

Рисунок 4.3 – Вікно відмови у вході

Після успішної автентифікації користувач отримує доступ до переліку доступних аеродромів (рис. 4.4). Інтерфейс дозволяє працювати з декількома об'єктами одночасно, що є важливим для систем моніторингу, орієнтованих на багатокористувацьке середовище [70]. Для кожного аеродрому відображається базова інформація та передбачено доступ до метеорологічних параметрів.

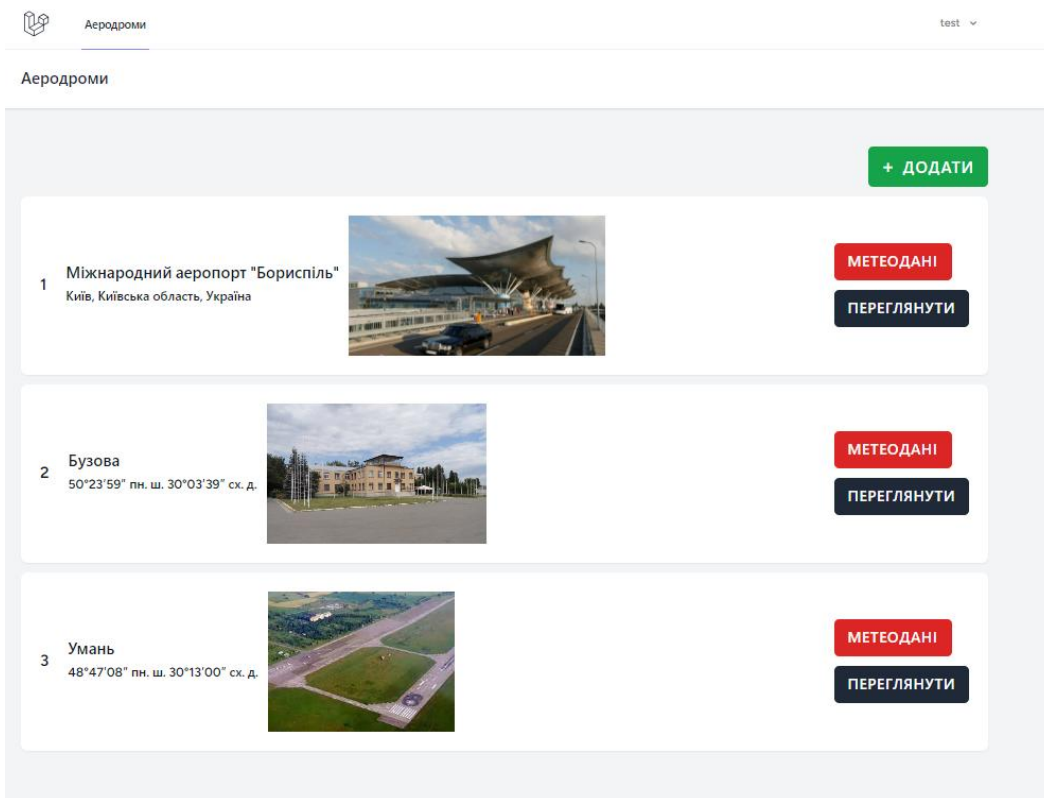


Рисунок 4.4 – Вікно відображення переліку аеродромів

Механізм додавання нових об'єктів реалізовано у вигляді окремого вікна (рис. 4.5), яке забезпечує введення ідентифікаційних та географічних характеристик аеродрому. Інтеграція з картографічним сервісом дозволяє візуально визначити розташування об'єкта, що підвищує точність введення даних [71].

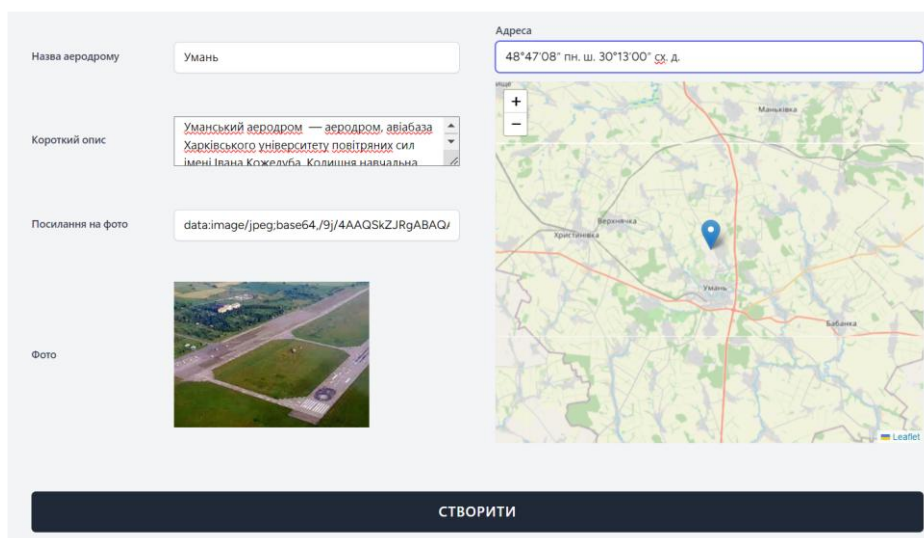


Рисунок 4.5 – Вікно описання аеродрому

Вікно представлення метеорологічної інформації (рис. 4.6) містить структурований набір параметрів, зокрема температуру, вологість, атмосферний тиск, швидкість і напрямок вітру, а також рівень туманності. Така організація інтерфейсу забезпечує швидке сприйняття даних та зручність їх аналізу.

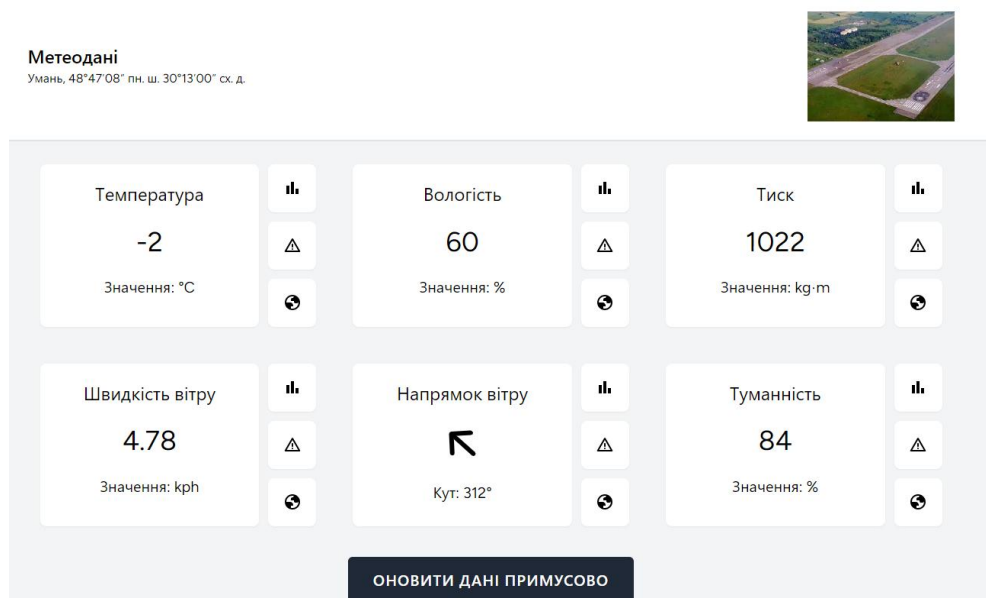


Рисунок 4.6 – Поточні метеорологічні дані для аеродрому

Джерелом даних у системі можуть виступати як зовнішні API-сервіси, так і власна метеостанція, розроблена у попередньому розділі, що забезпечує гнучкість у виборі джерел інформації та підвищує автономність системи.

Для аналізу динаміки змін параметрів реалізовано модуль графічної візуалізації (рис. 4.7), який відображає історичні значення у вигляді графіків.



Рисунок 4.7 – Графічне відображення історії значень

Відповідно до реалізованого алгоритму контролю достовірності, у випадку, якщо значення певного параметра виходить за межі допустимого діапазону або суттєво відрізняється від узагальнених значень, система відображає попереджувальний індикатор у вигляді спеціального символу (рис. 4.8).

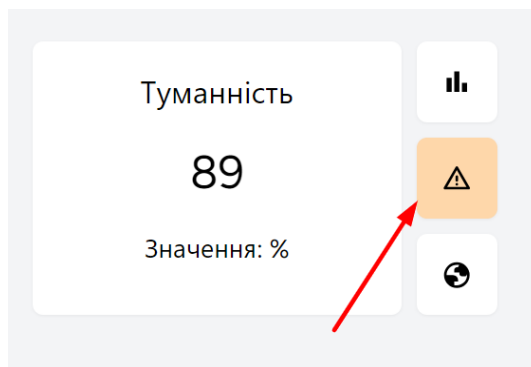


Рисунок 4.8 – Знак оклику, як попередження про вихід значень джерела за припустимий рівень відхилення

Такий індикатор сигналізує про можливу аномалію або помилку джерела даних і виконує важливу роль у підвищенні надійності системи. Його використання дозволяє операторам своєчасно реагувати на потенційно небезпечні ситуації, що є критично важливим у контексті забезпечення безпеки авіаційних процесів.

4.2 Тестування засобів штучного інтелекту в розробленій системі

На рисунку 4.9 продемонстровано інтерфейс системи моніторингу, в якому зафіксовано перевищення допустимого рівня одного з параметрів – туманності [72]. У відповідь на це система автоматично формує попередження та відображає індикатор аномалії.

На рисунку 4.10 представлено діалогове вікно з результатами аналізу, сформованого модулем штучного інтелекту. Система виконує інтерпретацію поточних і історичних значень параметра, визначає характер відхилення та формує текстове пояснення можливих наслідків для авіаційної діяльності. Це підвищує інформативність системи та підтримує процес прийняття рішень [73-78].

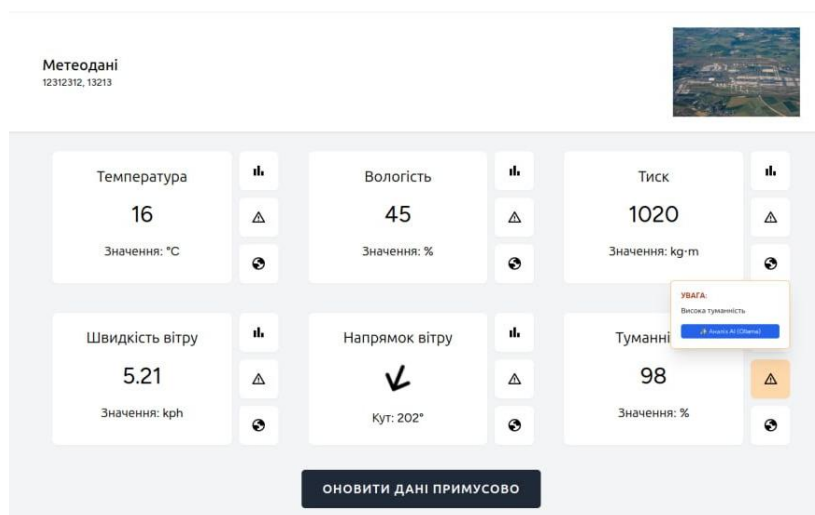


Рисунок 4.9 – Відображення попередження про аномальне значення метеорологічного параметра (туманність)

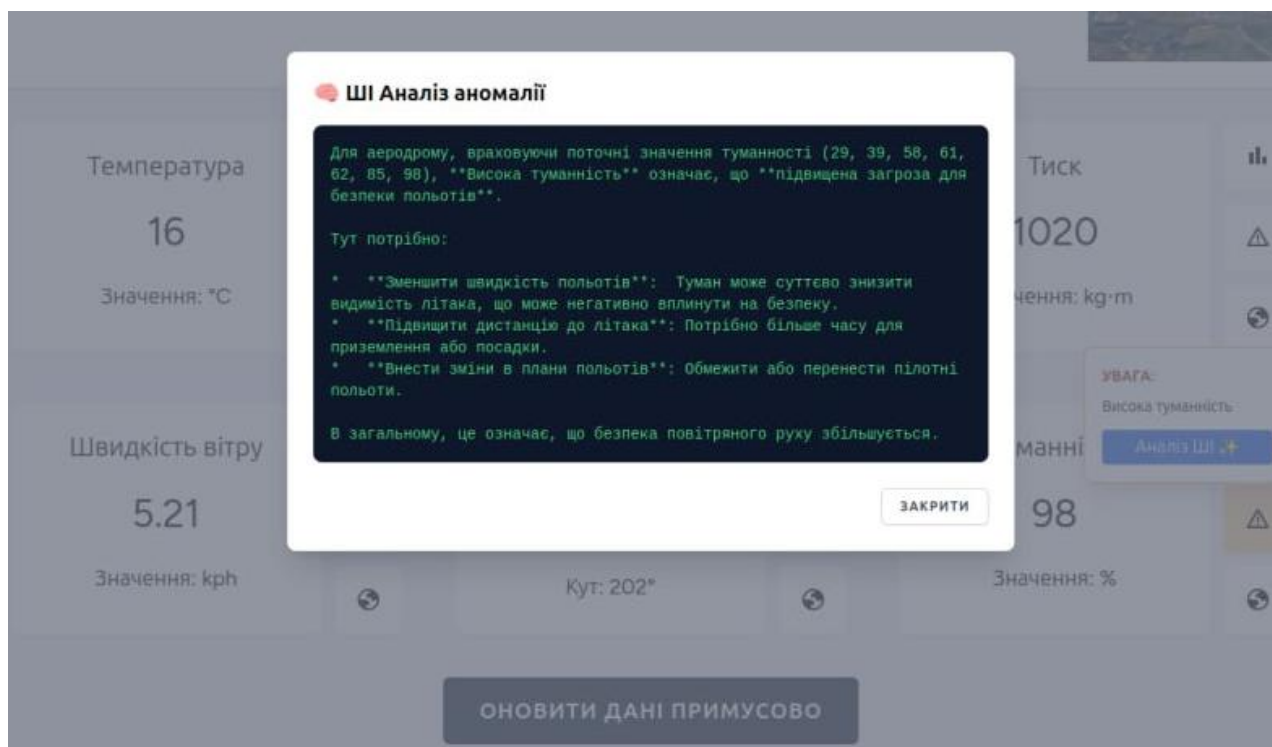


Рисунок 4.10 – Результат інтелектуального аналізу аномалії метеорологічних даних

На рисунку 4.11 зображено приклад ситуації, коли система фіксує небезпечні значення напрямку та швидкості вітру. Інтерфейс відображає попередження, що сигналізує про можливий вплив на безпечність польотів [79].

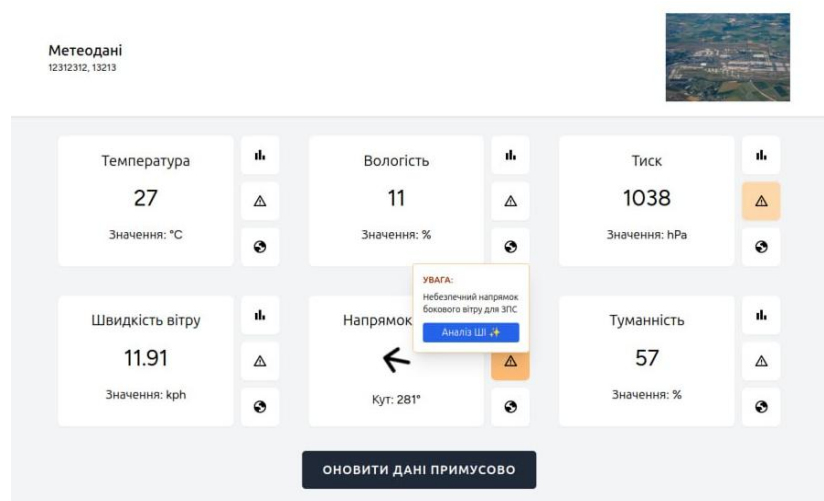


Рисунок 4.11 – Виявлення небезпечних метеорологічних умов (параметр напрямку вітру)

На рисунку 4.12 показано результат роботи модуля штучного інтелекту для аналізу вітрових характеристик [79]. Система формує текстовий висновок, який враховує поточні значення, історію змін та можливі ризики.

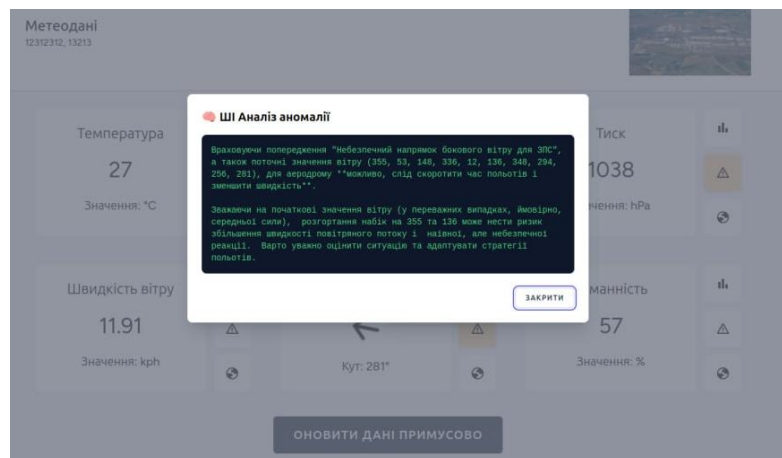


Рисунок 4.12 – Інтелектуальна інтерпретація небезпечних значень вітрових параметрів

На рисунку 4.13 наведено фрагмент програмного коду, який відповідає за підготовку запиту до модуля штучного інтелекту [79]. У запит включаються поточні значення параметра, одиниці вимірювання, історичні дані та інформація про попередження.

```

$history = collect($data['values'])->pluck('value')->implode(', ');

$prompt = "Ти асистент метеоролог. Параметр: {$data['param_name']}.
Одиниці вимірювання: {$data['unit']}.
Останнє значення: {$data['latest']}.
Історія значень: {$history}.
Система видала попередження: {$data['warning']}.
Поясни коротко, що це може означати для аеродрому.";

$response = Http::post('http://localhost:11434/api/generate', [
    'model' => 'gemma3:1b', // or your preferred model
    'prompt' => $prompt,
    'stream' => false
]);

```

Рисунок 4.13 – Формування запиту до модуля штучного інтелекту для аналізу метеоданих

На рисунку 4.14 представлено приклад структури даних у форматі JSON, яка використовується для передачі інформації до модуля інтелектуального аналізу. Дані містять поточне значення параметра, його назву, одиниці вимірювання, історію значень та сформоване попередження.

```

JSON
  latest: 80.77
  param_name: "Швидкість вітру"
  unit: "kph"
  values: (10)[...]
  warning: "Штормове попередження: сильний вітер"

```

Рисунок 4.14 – Структура вхідних даних для аналізу метеорологічних параметрів

Проведено серію перевірок коректності обробки даних, отриманих як із зовнішніх API, так і з власної метеостанції. У ході тестування перевірялась узгодженість форматів даних, правильність їх нормалізації та збереження у базі, а також швидкодія системи при багаторазових запитах. Окрему увагу приділено перевірці алгоритму інтеграції даних з кількох джерел та механізму визначення середнього значення з урахуванням відхилень.

Додатково протестовано роботу модуля інтелектуального аналізу, для чого використовувалися різні сценарії вхідних даних, включаючи нормальні та аномальні значення метеорологічних параметрів. Результати показали, що система здатна коректно виявляти відхилення, формувати попередження та генерувати текстові пояснення, що можуть бути використані для підтримки прийняття рішень.

4.3 Висновки до розділу 4

Ключовим результатом розділу є інтеграція модуля інтелектуального аналізу на основі методів машинного навчання. Реалізований підхід дозволяє не лише відображати поточні метеорологічні параметри, але й виконувати їх інтерпретацію, виявляти аномальні відхилення та формувати пояснення щодо можливих наслідків для авіаційної діяльності. Використання таких методів суттєво підвищує аналітичні можливості системи та наближає її до класу інтелектуальних кіберфізичних систем.

ВИСНОВКИ

У кваліфікаційній роботі розв'язано актуальну науково-прикладну задачу розробки кіберфізичної системи моніторингу метеорологічних параметрів для малих аеродромів із використанням сучасних методів обробки даних та елементів машинного навчання. Актуальність дослідження обумовлена необхідністю підвищення рівня авіаційної безпеки в умовах обмеженої інфраструктури малих аеродромів, де своєчасність і точність метеорологічної інформації безпосередньо впливають на прийняття рішень під час польотів.

У теоретичній частині роботи виконано системний аналіз ролі метеорологічних даних у забезпеченні безпечного функціонування авіаційних об'єктів. Встановлено, що ефективність прийняття рішень у процесі планування та виконання польотів значною мірою залежить від якості інтеграції, узгодженості та інтерпретації метеорологічної інформації. Проведений огляд існуючих підходів до інтеграції даних (зокрема стандартизованих форматів і систем обміну) дозволив виявити їх обмеження, пов'язані з неоднорідністю джерел, затримками оновлення та відсутністю адаптивних механізмів аналізу.

У межах дослідження сформовано функціональні та технічні вимоги до системи, що враховують специфіку кіберфізичних систем: поєднання сенсорного рівня, обчислювальних модулів і програмного середовища. Запропонована архітектура забезпечує збір, передачу, обробку та зберігання метеорологічних параметрів у режимі, наближеному до реального часу.

Розробка апаратної частини дозволила реалізувати прототип пристрою збору даних, який інтегрує декілька типів сенсорів (температури, вологості, тиску) з мікроконтролерною платформою. Обґрунтовано вибір компонентів з урахуванням точності, енергоефективності та вартості. Проведена інтеграція сенсорів, модулів зв'язку та обчислювального вузла підтвердила можливість побудови автономної системи збору метеоданих, придатної до подальшого масштабування.

У програмній частині реалізовано модульну архітектуру системи, яка включає компоненти збору, попередньої обробки, зберігання, інтеграції та

візуалізації даних. Особливу увагу приділено механізмам синхронізації інформації з різних джерел, що дозволяє підвищити достовірність і повноту метеорологічних даних.

Наукова новизна роботи полягає у розвитку підходу до інтеграції метеорологічних даних шляхом поєднання традиційних методів збору інформації з інтелектуальними алгоритмами аналізу. Зокрема, запропоновано використання моделей машинного навчання для обробки часових рядів метеорологічних параметрів, що дозволяє:

- виявляти приховані закономірності зміни погодних умов;
- здійснювати короткострокове прогнозування параметрів середовища;
- ідентифікувати аномальні значення, які можуть свідчити про потенційно небезпечні ситуації.

Інтеграція інтелектуального модуля у загальну архітектуру системи дозволила перейти від пасивного збору даних до активної підтримки прийняття рішень, що є характерною ознакою сучасних кіберфізичних систем.

Практичне значення отриманих результатів полягає у створенні працездатної системи, яка може бути використана для моніторингу метеорологічних умов на малих аеродромах. Розроблене рішення забезпечує:

- підвищення оперативності отримання метеоданих;
- покращення якості їх аналізу;
- можливість прогнозування змін погодних умов;
- інтеграцію з іншими інформаційними системами авіаційної інфраструктури.

Результати роботи можуть бути використані як основа для подальшого розвитку систем моніторингу, зокрема шляхом розширення функціональності, підвищення точності моделей машинного навчання та впровадження додаткових джерел даних.

ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАНЬ

1. Валуєк О.І. Метеорологічне обладнання і методи спостережень. Практикум: Навчальний посібник. Рівне: НУВГП, 2018. 216 с.
2. Волохов Г.С., Сатейник Л.В. Основи метеорологічних досліджень. КНУ, 2014. 346 с.
3. Івус Г.П., Семергей-Чумаченко А.Б. Авіаційна метеорологія: Конспект лекцій. Дніпропетровськ: ПБП «Економіка». 2006. 140 с.
4. Горкавий О.В. Технічні засоби гідрометеорологічної служби. Одеса: Одеський державний екологічний університет, 2018. 136 с.
5. Vitas V., Berans J., Kubrat T. Flight management technologies for single pilot operations in Small Air Transport vehicles in the COAST project. *IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng.* vol. 1024. 012089.
6. Аналіз стану безпеки польотів за результатами розслідування авіаційних подій та інцидентів з цивільними повітряними суднами України та іноземними ПС, що сталися у 2022 році. Національне бюро з розслідування авіаційних подій та інцидентів з цивільними повітряними суднами. 57 с.
7. Волощук В.М., Бойченко С.Г., Щербань І.М. Оцінка кліматичних умов в Україні. К.: РанПрининт. 2013. 346 с.
8. Shevchenko O., Lee H., Snizhko S., Mayer H. Long-term analysis of heat waves in Ukraine. *International Journal of Climatology*. 2014. 34 (5). pp. 1642-1650. DOI: 10.1002/joc.3792
9. Demuzere M., Bechtel B., Middel A., Mills G. Mapping Europe into local climate zones. *PLoS ONE*, 2019. 14 (4), no. e0214474. DOI: 10.1371/journal.pone.0214474
10. Montesarchio M., Zollo A., Ferrucci M., Bucchignani E. Latest developments in AWAS: the Advanced Weather Awareness System in the COAST Project. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2021. Volume 1226. DOI: 10.1088/1757-899X/1226/1/012089

11. Gorzybowski P., Szpakowska-Peas E. Flight reconfiguration system an emergency system of the future. *Aircraft Engineering and Aerospace Technology*, 2020. DOI: 10.1108/AEAT-03-2020- 0052.

12. Saba T., Rehman A., AlGhamdi J.S. Weather forecasting based on hybrid neural model. *Appl. Water Sci.* 2017. vol. 7. pp. 3869–3874. DOI: 10.1007/s13201-017-0538-0

13. Leelavinodhan P.B., Vecchio M., Antonelli F., Maestrini A., Brunelli D. Design and Implementation of an Energy-Efficient Weather Station for Wind Data Collection. *Sensors*. 2021. vol. 21. 3831. DOI: 10.3390/s21113831

14. Прусов В. А., Сніжко С.І. Методи прикладного системного аналізу в гідрометеорології: підручник. Київ. нац. ун-т ім. Тараса Шевченка. Київ: Прінт Сервіс. 2017. 701 с.

15. Прусов В.А., Сніжко С.І. Математичне моделювання атмосферних процесів. К.: Ніка-Центр. 2005. 496 с.

16. Сніжко С.І., Прусов В.А. Динамічна метеорологія. Київський національний університет імені Тараса Шевченка, ВПЦ «Київський університет». 2009. 496 с. ISBN 966-521-358-X.

17. Gubbi J., Buyya R., Marusic S., Palaniswami M. Internet of Things (IoT): A vision, architectural elements, and future directions. *Future Generation Computer Systems*. 2013. Vol. 29(7). P. 1645–1660. DOI: 10.1016/j.future.2013.01.010.

18. Perera C., Liu C.H., Jayawardena S. The emerging Internet of Things marketplace from an industrial perspective: A survey. *IEEE Transactions on Emerging Topics in Computing*. 2015. Vol. 3(4). P. 585–598. DOI: 10.1109/TETC.2015.2390034.

19. Mekki K., Bajic E., Chaxel F., Meyer F. A comparative study of LPWAN technologies for large-scale IoT deployment. *ICT Express*. 2019. Vol. 5(1). P. 1–7. DOI: 10.1016/j.icte.2017.12.005.

20. Chakraborty I., Das P. Data fusion in wireless sensor networks: A survey. *International Journal of Scientific Research in Network Security and Communication*. 2017. Vol. 5(6). P. 9–15. DOI: 10.26438/ijsrnsc/v5i6.915.

21. Goodfellow I., Bengio Y., Courville A. Deep Learning. The MIT Press. 2016. 800 pp. ISBN: 0262035618.
22. Hochreiter S., Schmidhuber J. Long Short-Term Memory. *Neural Computation*. 1997. Vol. 9(8). P. 1735–1780. DOI: 10.1162/neco.1997.9.8.1735.
23. Shi X., Chen Z., Wang H., Yeung D.Y., Wong W.K., Woo W.C. Convolutional LSTM Network: A Machine Learning Approach for Precipitation Nowcasting. *Advances in Neural Information Processing Systems*. 2015. DOI: 10.48550/arXiv.1506.04214.
24. Abadi M. et al. TensorFlow: Large-Scale Machine Learning on Heterogeneous Distributed Systems. *arXiv*. 2016. DOI: 10.48550/arXiv.1603.04467.
25. Bengio Y. Learning Deep Architectures for AI. *Foundations and Trends in Machine Learning*. 2009. Vol. 2(1). P. 1–127. DOI: 10.1561/22000000006.
26. LeCun Y., Bengio Y., Hinton G. Deep learning. *Nature*. 2015. Vol. 521. P. 436–444. DOI: 10.1038/nature14539.
27. Sayor J.J.A.M., Shishir N.T., Barmon B.B., Ahemed S., Rahman M.M. IoT-driven real-time weather measurement and forecasting mobile application with machine learning integration. *Array*. 2025. Vol. 25. DOI: 10.1016/j.array.2025.100474.
28. Hamad A.R., Abdulateef A.N., Sabbar B.M., Mnati M.J. Integrating Machine Learning in IoT Solutions for Real-Time Weather Forecasting Systems. *Instrumentation Mesure Métérologie*. 2025. Vol. 24(2). P. 119–129. DOI: 10.18280/i2m.240203.
29. Kim J., Minagawa D., Saito D., Kanda K. Development of KOSEN Weather Station and Provision of Weather Information to Farmers. *Sensors*. 2022. Vol. 22(6). P. 2247. DOI: 10.3390/s22062108.
30. Mabrouki J., Azroul M., Dhiba D., El Hajjaji S. IoT-Based Data Logger for Weather Monitoring Using Arduino-Based Wireless Sensor Networks with Remote Graphical Application and Alerts. *Big Data Mining and Analytics*. 2021. Vol. 4(1). P. 25–32. DOI: 10.26599/BDMA.2020.9020018.
31. Mamat N.H., Shazali H.A., Othman W.Z. Development of a Weather Station with Water Level and Waterflow Detection Using Arduino. *Journal of Physics: Conference Series*. 2022. Vol. 2319. DOI: 10.1088/1742-6596/2319/1/012020.

32. Vulova S., Meier F., Fenner D., Kleinschmit B. Summer Nights in Berlin, Germany: Modeling Air Temperature Spatially With Remote Sensing, Crowdsourced Weather Data, and Machine Learning. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*. 2020. Vol. 13. P. 5074–5087. DOI: 10.1109/JSTARS.2020.3019696.
33. Obasi C.C., Iruoghene A.I., Ikharo B.A. Design and deployment of an IoT-based mini weather station network for campus-scale wind energy monitoring. *Journal of Electrical Systems and Information Technology*. 2026. Vol. 13. DOI: 10.1186/s43067-026-00337-x.
34. Isler B., Aydin M. Fog-Enabled Machine Learning Approaches for Weather Forecasting in IoT Sensor Networks. *Sensors*. 2025. Vol. 25(13). P. 4070. DOI: 10.3390/s25134070.
35. Ren J., Lee S.D., Chen X., Kao B., Cheng R., Cheung D. Naive Bayes Classification of Uncertain Data. *Proceedings of the IEEE International Conference on Data Mining*. 2009. P. 944–949. DOI: 10.1109/ICDM.2009.90.
36. Saritas M.M., Yasar A. Performance Analysis of ANN and Naive Bayes Classification Algorithm for Data Classification. *International Journal of Intelligent Systems and Applications in Engineering*. 2019. Vol. 7(2). P. 88–91. DOI: 10.18201/ijisae.2019252786.
37. Miao S. Machine Learning-Based Aviation Meteorological Risk Prediction. *International Journal of Information Technology & Decision Making*. 2025. DOI: 10.1142/S2010324724400113.
38. Fahim M., Hasan M., Islam S. Modeling and Implementation of a Low-Cost IoT-Smart Weather Monitoring System. *Scientific Reports*. 2023. Vol. 13. DOI: 10.1038/s41598-023-28895-5.
39. Hahn C., Garcia-Marti I., Sugier J., Ziska F. Observations from Personal Weather Stations EUMETNET Interests and Experience. *Meteorological Applications*. 2022. Vol. 29(6). DOI: 10.1002/met.2104.

40. Gryech I., Assad C., Ghogho M., Kobbane A. Applications of Machine Learning and IoT for Outdoor Air Pollution Monitoring and Prediction: A Systematic Literature Review. *arXiv*. 2024. DOI: 10.48550/arXiv.2401.01788.
41. Agarwal A.B., Rajesh R., Arul N. Spatially-Resolved Hyperlocal Weather Prediction and Anomaly Detection Using IoT Sensor Networks and Machine Learning Techniques. *arXiv*. 2023. DOI: 10.48550/arXiv.2310.11001.
42. Gangwar A., Singh S., Mishra R., Prakash S. The State-of-the-Art in Air Pollution Monitoring and Forecasting Systems Using IoT, Big Data, and Machine Learning. *arXiv*. 2023. DOI: 10.48550/arXiv.2304.09574.
43. Li H., Wang X., Feng Y., Qi Y., Tian J. Driving Intelligent IoT Monitoring and Control through Cloud Computing and Machine Learning. *arXiv*. 2024. DOI: 10.48550/arXiv.2403.18100.
44. Wisanwanichthan T., Thammawichai M. A Double-Layered Hybrid Approach for Network Intrusion Detection System Using Combined Naive Bayes and SVM. *IEEE Access*. 2021. Vol. 9. P. 138432–138445. DOI: 10.1109/ACCESS.2021.3118573.
45. İşler B., Kaya Ş. M., Kılıç F.R. Fog-Enabled Machine Learning Approaches for Weather Prediction in IoT Systems: A Case Study. *Sensors*. 2025. 25(13). 4070. <https://doi.org/10.3390/s25134070>.
46. Sadhukhan M., Sudakshina D., Indrajit B. An Intelligent Weather Prediction System Based on IOT. *Devices for Integrated Circuit (DevIC)*. 2021. pp. 528-532.
47. Salman A. G., Kanigoro B., Heryadi Y. Weather forecasting using deep learning techniques. *International Conference on Advanced Computer Science and Information Systems (ICACSIS)*. Depok, Indonesia. 2015. pp. 281-285. DOI: 10.1109/ICACSIS.2015.7415154.
48. Salman A.G., Heryadi Y., Abdurahman E. Weather Forecasting Using Deep Learning Techniques and Internet of Things Architecture. *Procedia Computer Science*. 2020. Vol. 179. P. 442–448. DOI: 10.1109/ICACSIS.2015.7415154.
49. Niemczyk M., Mol M. Edge AI for Aviation Traffic Forecasting A Weather-Aware System on Jetson Orin Nano. *9th International Conference on Computer Science*

and Artificial Intelligence (CSAI '25). Association for Computing Machinery, New York, NY, USA. 2026. pp. 610–614. DOI: 10.1145/3788149.3788152.

50. Atzori L., Iera A., Morabito G. The Internet of Things: A survey. *Computer Networks*. 2010. Vol. 54(15). P. 2787-2805. DOI: 10.1016/j.comnet.2010.05.010

51. Miorandi D., Sicari S., De Pellegrini F., Chlamtac I. Internet of things: Vision, applications and research challenges. *Ad Hoc Networks*. 2012. Vol. 10(7). P. 1497-1516. DOI: 10.1016/j.adhoc.2012.02.016

52. Zhang D., Yang L. T., Chen M., Zhao S., Guo M., Zhang Y. Real-time locating systems using active RFID for Internet of Things. *IEEE Systems Journal*. 2016. Vol. 10(3). P. 1226-1235. DOI: 10.1109/JSYST.2014.2346625

53. Adi E., Anwar A., Baig Z., Zeadally S. Machine learning and data analytics for the IoT. *Neural Computing and Applications*. 2020. Vol. 32. P. 16205-16233. DOI: 10.1007/s00521-020-04874-y

54. Monedero I., Garcia M., Quesada J. Cyber-Physical System for Environmental Monitoring Based on Deep Learning. *Sensors*. 2021. Vol. 21(11). Article 3655. DOI: 10.3390/s21113655

55. Leelavinodhan P. B., Vecchio M., Antonelli F., Maestrini A., Brunelli D. Design and Implementation of an Energy-Efficient Weather Station for Wind Data Collection. *Sensors*. 2021. Vol. 21(11). Article 3831. DOI: 10.3390/s21113831

56. Mabrouki J., Azrou M., Dhiba D., Farhaoui Y., El Hajjaji S. IoT-Based Data Logger for Weather Monitoring Using Arduino-Based Wireless Sensor Networks with Remote Graphical Application and Alerts. *Big Data Mining and Analytics*. 2021. Vol. 4(1). P. 25-32. DOI: 10.26599/BDMA.2020.9020018

57. Shi X., Chen Z., Wang H., Yeung D. Y., Wong W. K., Woo W. C. Convolutional LSTM Network: A Machine Learning Approach for Precipitation Nowcasting. *Advances in Neural Information Processing Systems*. 2015. DOI: 10.48550/arXiv.1506.04214

58. Waher P. Mastering Internet of Things. Design and create your own IoT applications using Raspberry Pi 3. - BIRMINGHAM – MUMBAI: PacktPublishing Ltd, 2018. 398 pp.

59. Лещенко Г.П. Авіаційна метеорологія. Кропивницький: ЛА НАУ, 2019. 332 с.
60. Rasp S., Dueben P. D., Scher S., Weyn J. A., Mouatadid S., Thuerey N. WeatherBench: A Benchmark Data Set for Data-Driven Weather Forecasting. *Journal of Advances in Modeling Earth Systems*. 2020. Vol. 12(11). DOI: 10.1029/2020MS002203
61. Ravuri S., Lenc K., Willson M. et al. Skilful precipitation nowcasting using deep generative models of radar. *Nature*. 2021. Vol. 597. P. 672-677. DOI: 10.1038/s41586-021-03854-z
62. Lam R., Sanchez-Gonzalez A., Willson M. et al. Learning skillful medium-range global weather forecasting. *Science*. 2023. Vol. 382(6677). P. 1416-1421. DOI: 10.1126/science.adi2336
63. Bi K., Xie L., Zhang H., Chen X., Gu X., Tian Q. Accurate medium-range global weather forecasting with 3D neural networks. *Nature*. 2023. Vol. 619. P. 533-538. DOI: 10.1038/s41586-023-06185-3
64. Price I., Sanchez-Gonzalez A., Alet F. et al. Probabilistic weather forecasting with machine learning. *Nature*. 2025. DOI: 10.1038/s41586-024-08252-9
65. Chen L., Zhong X., Zhang F. et al. FuXi: a cascade machine learning forecasting system for 15-day global weather forecast. *npj Climate and Atmospheric Science*. 2023. Vol. 6. Article 190. DOI: 10.1038/s41612-023-00512-1
66. Pathak J., Subramanian S., Harrington P. et al. FourCastNet: A Global Data-driven High-resolution Weather Model using Adaptive Fourier Neural Operators. *arXiv*. 2022. DOI: 10.48550/arXiv.2202.11214
67. Hersbach H., Bell B., Berrisford P. et al. The ERA5 global reanalysis. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*. 2020. Vol. 146(730). P. 1999-2049. DOI: 10.1002/qj.3803
68. Reichstein M., Camps-Valls G., Stevens B. et al. Deep learning and process understanding for data-driven Earth system science. *Nature*. 2019. Vol. 566. P. 195-204. DOI: 10.1038/s41586-019-0912-1

69. Isler B., Aydin M. Fog-Enabled Machine Learning Approaches for Weather Forecasting in IoT Sensor Networks. *Sensors*. 2025. Vol. 25(13). Article 4070. DOI: 10.3390/s25134070
70. Weyn J. A., Durran D. R., Caruana R. Improving Data-Driven Global Weather Prediction Using Deep Convolutional Neural Networks on a Cubed Sphere. *Journal of Advances in Modeling Earth Systems*. 2020. Vol. 12(9). DOI: 10.1029/2020MS002109
71. Chattopadhyay A., Hassanzadeh P., Pasha S. Predicting clustered weather patterns: A test case for applications of convolutional neural networks to spatio-temporal climate data. *Scientific Reports*. 2020. Vol. 10. Article 1317. DOI: 10.1038/s41598-020-57897-9
72. Bell Ch. *Beginning Sensor Networks with Arduino and Raspberry Pi*. – New York: Apress, 2013. 407 pp.
73. Scher S., Messori G. Predicting weather forecast uncertainty with machine learning. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*. 2021. Vol. 147(734). P. 283-299. DOI: 10.1002/qj.3916
74. Agrawal S., Barrington L., Bromberg C., Burge J., Gazen C., Hickey J. Machine Learning for Precipitation Nowcasting from Radar Images. *arXiv*. 2019. DOI: 10.48550/arXiv.1912.12132
75. Chen J., Li K., Tang Z., Bilal K., Yu S., Weng C., Li K. A Parallel Random Forest Algorithm for Big Data in a Spark Cloud Computing Environment. *IEEE Transactions on Parallel and Distributed Systems*. 2017. Vol. 28(4). P. 919–933. DOI: 10.1109/TPDS.2016.2603511
76. Nguyen T., Brandstetter J., Kapoor A. *ClimaX: A Foundation Model for Weather and Climate*. *arXiv*. 2023. DOI: 10.48550/arXiv.2301.10343
77. Keisler R. Forecasting Global Weather with Graph Neural Networks. *arXiv*. 2022. DOI: 10.48550/arXiv.2202.07575
78. Rasp S., Dueben P. D., Scher S., Weyn J. A., Mouatadid S., Thuerey N. WeatherBench: A Benchmark Data Set for Data-Driven Weather Forecasting. *Journal of Advances in Modeling Earth Systems*. 2020. Vol. 12(11). DOI: 10.1029/2020MS002203

79. Якимовський В.В. Кіберфізична система моніторингу метеорологічних параметрів для малих аеродромів. 17-а Міжнародна студентська науково-технічна конференція «Перспективні мережеві та комп'ютерні технології» (ПЕРСИК 2026). Харків, ХАІ. 2026. с. 27-28.

80. ДСТУ 3008-95 Документація. Звіти у сфері науки і техніки. Структура і правила оформлення.

81. НД ТЗІ 1.1-003-99. Термінологія у області захисту інформації в комп'ютерних системах від несанкціонованого доступу. // Департамент спеціальних телекомунікаційних систем і захисту інформації Служби безпеки України. – Київ, 1999.

ДОДАТОК А

(обов'язковий)

Програмний код апаратного модуля

```
#include <DHT.h>
#include <Wire.h>
#include <Adafruit_BMP085.h>
#include <OneWire.h>
#include <DallasTemperature.h>
#include <SoftwareSerial.h>

#define DHT_PIN 2
#define DHT_TYPE DHT22
#define ONE_WIRE_PIN 3
#define BT_RX 10
#define BT_TX 11

DHT dht(DHT_PIN, DHT_TYPE);
Adafruit_BMP085 bmp;

OneWire oneWire(ONE_WIRE_PIN);
DallasTemperature ds18b20(&oneWire);

SoftwareSerial bluetooth(BT_RX, BT_TX);

unsigned long previousMillis = 0;
const unsigned long measureInterval = 5000;

void setup() {
  Serial.begin(9600);
  bluetooth.begin(9600);
```

```
dht.begin();
ds18b20.begin();

if (!bmp.begin()) {
  Serial.println("BMP180 не знайдено");
  bluetooth.println("ERROR:BMP180_NOT_FOUND");
}

Serial.println("Система моніторингу метеопараметрів запущена");
bluetooth.println("METEO_SYSTEM_READY");
}

void loop() {
  unsigned long currentMillis = millis();

  if (currentMillis - previousMillis >= measureInterval) {
    previousMillis = currentMillis;

    float humidity = dht.readHumidity();
    float dhtTemperature = dht.readTemperature();

    ds18b20.requestTemperatures();
    float dsTemperature = ds18b20.getTempCByIndex(0);

    float pressurePa = bmp.readPressure();
    float pressureHPa = pressurePa / 100.0;

    if (isnan(humidity) || isnan(dhtTemperature)) {
      Serial.println("Помилка зчитування DHT22");
      bluetooth.println("ERROR:DHT22_READ_FAILED");
      return;
    }
  }
}
```

```
}
```

```
if (dsTemperature == DEVICE_DISCONNECTED_C) {  
    Serial.println("Помилка зчитування DS18B20");  
    bluetooth.println("ERROR:DS18B20_READ_FAILED");  
    return;  
}
```

```
String dataPacket = "";  
dataPacket += "TEMP_DHT22=" + String(dhtTemperature, 1) + ";";  
dataPacket += "HUMIDITY=" + String(humidity, 1) + ";";  
dataPacket += "TEMP_DS18B20=" + String(dsTemperature, 1) + ";";  
dataPacket += "PRESSURE=" + String(pressureHPa, 1) + ";";  
dataPacket += "STATUS=OK";
```

```
Serial.println(dataPacket);  
bluetooth.println(dataPacket);  
}  
}
```

ДОДАТОК Б (обов'язковий)

Опублікована теза 17-а Міжнародній студентській науково-технічній конференції «Перспективні мережеві та комп'ютерні технології» – ПЕРСИК 2026.

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНА АКАДЕМІЯ НАУК УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «КИЇВСЬКИЙ
АВІАЦІЙНИЙ ІНСТИТУТ»

XVII МІЖНАРОДНА
НАУКОВО-ПРАКТИЧНА
КОНФЕРЕНЦІЯ



КОМП'ЮТЕРНІ СИСТЕМИ
ТА МЕРЕЖНІ ТЕХНОЛОГІЇ
26-27 травня 2026 р.

КИЇВ

МЕТА КОНФЕРЕНЦІЇ

Мета конференції – аналіз і узагальнення нових теоретичних та практичних результатів в галузі комп'ютерної інженерії, штучного інтелекту, бездротових мережних технологій, розвиток наукової співпраці між закладами освіти, науковими установами України та зарубіжжя в сфері IT-технологій.

СЕКЦІЇ

Секція 1. Комп'ютерна інженерія

Секція 2. Інформаційні технології проектування та управління

Секція 3. Системи та технології кібербезпеки

Робочі мови: українська, англійська

20 травня 2026 – кінцевий термін прийняття заявок та електронної версії тез доповіді.
22 травня 2026 – термін отримання інформаційного повідомлення про прийняття.

Детальна інформація про конференцію за посиланням <http://csnt.nau.edu.ua>

Форма проведення конференції – **ОНЛАЙН**

Участь у Конференції – **БЕЗКОШТОВНА**

Протягом 7 днів за результатами Конференції буде опубліковано Збірник тез на сайті <http://csnt.nau.edu.ua>

КОНТАКТНА ІНФОРМАЦІЯ

Адреса Національного авіаційного університету (секретаріат)

03058, м. Київ, пр. Любомира Гузара, 1, НАУ, корп. 5, ауд. 116

Телефони секретаріату Конференції:

044-406-76-78

Ковальчук Олена Олександрівна

E-mail: csnt@kai.edu.ua

УДК 004.89

Львівський В.В.
Хмельницький національний університет, Valerii.lukatskiy@gmail.com

КІБЕРФІЗИЧНА СИСТЕМА МОНІТОРИНГУ МЕТЕОРОЛОГІЧНИХ ПАРАМЕТРІВ ДЛЯ МАЛИХ АЕРОПРОМІВ

Вступ

Забезпечення безпеки польотів є одним із ключових завдань сучасної авіаційної галузі, особливо в умовах експлуатації малих аеродромів, які часто не мають розвинутої інфраструктури метеорологічного забезпечення. Одним із визначальних факторів, що впливає на прийняття рішень під час виконання польотів, є актуальність і достовірність метеорологічної інформації [1].

На відміну від великих аеропортів, де функціонують автоматизовані системи спостереження, малі аеродроми часто використовують обмежену кількість джерел даних або взагалі покладаються на відкриті метеосервіси. Це створює проблему фрагментарності, неточності та несинхронізованості інформації, що може призводити до підвищення ризиків під час зльоту, посадки та навігації.

У зв'язку з цим актуальним є розроблення кіберфізичних систем, які забезпечують інтеграцію локальних сенсорів і зовнішніх джерел даних, їх синхронізацію, перевірку достовірності та інтелектуальний аналіз у режимі, найбільш наближеному до реального часу.

Основна частина

Кіберфізична система моніторингу метеорологічних параметрів являє собою інтегровану структуру, що поєднує фізичні пристрої вимірювання, канали передачі даних та програмні засоби їх обробки.

На фізичному рівні здійснюється безпосередній збір метеорологічних параметрів за допомогою сенсорів температури, вологості, атмосферного тиску, швидкості та напрямку вітру. Дані зчитуються мікроконтролерними пристроями, які виконують первинну обробку та передають інформацію до центральної системи.

Комунікаційний рівень забезпечує передачу даних із сенсорів до серверної частини системи, а також інтеграцію із зовнішніми джерелами, такими як метеорологічні API-сервіси та авіаційні бази даних.

Однією з ключових задач є синхронізація даних, отриманих із різних джерел. Вона включає приведення даних до єдиного формату, нормалізацію одиниць вимірювання та узгодження часових міток.

Важливим компонентом системи є модуль перевірки достовірності даних. Він реалізує алгоритми виявлення аномалій, що базуються на порівнянні значень із різних джерел та оцінці їх відхилення від середнього значення.

Аналітичний рівень передбачає застосування методів машинного навчання для обробки метеорологічних даних [2]. Зокрема, моделі, що працюють із часовими рядами, дозволяють прогнозувати зміну погодних умов, виявляти потенційно небезпечні ситуації та формувати рекомендації для користувачів.

Усі оброблені дані зберігаються в централізованій базі даних, яка забезпечує накопичення історичної інформації, підтримку аналітичних запитів та формування звітів.

Рівень взаємодії з користувачем реалізується у вигляді веб-інтерфейсу, що забезпечує доступ до актуальних та історичних метеоданих, їх візуалізацію у вигляді графіків, а також інформування про відхилення або небезпечні ситуації.

Для забезпечення надійного моніторингу метеорологічних параметрів на малих аеродромах доцільно застосовувати кіберфізичний підхід до побудови системи, який поєднує фізичні вимірні пристрої, комунікаційну інфраструктуру та програмно-аналітичні компоненти (рис. 1).

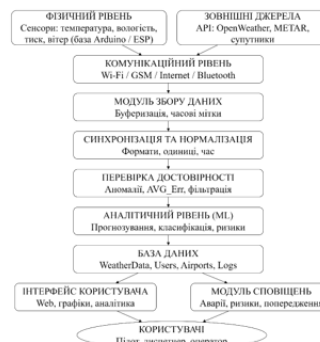


Рис. 1. Архітектура кіберфізичної системи моніторингу метеорологічних параметрів. На нижньому рівні архітектури розташовані фізичні сенсори та зовнішні джерела даних, які формують первинний інформаційний потік. Через комунікаційний рівень ці дані передаються до модуля збору, синхронізації та валідації, де відбувається їх нормалізація, перевірка достовірності та усунення аномалій. Дані інформації обробляються на аналітичному рівні із застосуванням методів машинного навчання, що дозволяє виконувати прогнозування та виявлення ризиків. Оброблені дані зберігаються у базі даних і передаються до користувацьких інтерфейсів та модуля сповіщень, забезпечуючи оперативне інформування пілотів, диспетчерів та інших користувачів для прийняття обґрунтованих рішень в умовах змінних метеорологічних факторів.

Зпропонований підхід до побудови кіберфізичної системи моніторингу метеорологічних параметрів дозволяє ефективно вирішити проблему інтеграції та аналізу даних для малих аеродромів. Поєднання локальних сенсорів із зовнішніми джерелами інформації забезпечує повноту та надійність метеорологічних даних.

Використання методів синхронізації та перевірки достовірності дозволяє зменшити вплив помилок і підвищити точність отриманих результатів. Застосування алгоритмів машинного навчання відкриває можливість для прогнозування погодних умов і своєчасного виявлення небезпечних ситуацій.

СПИСОК ПОСИЛАНЬ

- [1] Montesarchio M., Zollo A., Ferrucci M., Bucchigiani E. (2022) Latest developments in AWAS: the Advanced Weather Awareness System in the COAST Project. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, Volume 1226 (1): 012089.
- [2] Saba T., Rehman A., AlGhamdi J.S. Weather forecasting based on hybrid neural model. Appl. Water Sci. 2017, 7, 3869–3874.

ДОДАТОК В

(обов'язковий)

Презентація

Хмельницький національний університет
Факультет інформаційних технологій
Кафедра комп'ютерної інженерії та інформаційних систем

Кіберфізична система моніторингу метеорологічних параметрів для малих аеродромів на підставі методів машинного навчання

Здобувач: Якимовський Валерій Віталійович

Керівник: д.т.н., професор Федоров Євген Євгенович

1

79

АКТУАЛЬНІСТЬ ДОСЛІДЖЕННЯ

Авіаційна безпека – це основний пріоритет при обробці метеорологічних даних. Метеоумови, а особливо в окремих регіонах можуть призвести до аварій, погіршити видимість для пілотів, обмежити операційні можливості літаків і навіть призвести до скасування польотів. Саме тому вчені, інженери та авіаційні спеціалісти постійно працюють над розробкою нових технологій і систем, які допоможуть покращити передбачення погоди і забезпечити пілотам та диспетчерам потрібну інформацію для прийняття безпечних рішень, розробити спеціальні підходи для покращення обробки метеоданих.

2

АКТУАЛЬНІСТЬ ДОСЛІДЖЕННЯ

Основна проблема, яка виникає у контексті метеоданих на малих аеродромах, полягає в обмеженості ресурсів та обладнання на таких аеродромах, а також в потребі в надійному та ефективному зборі, обробці та використанні інформації про погоду і відсутності сучасних систем інтеграції, які б забезпечували автоматизований збір та аналіз метеоданих і надавали б цю інформацію диспетчерам, пілотам та іншим зацікавленим сторонам.

3

МЕТА, ОБ'ЄКТ ТА ПРЕДМЕТ ДОСЛІДЖЕННЯ

Об'єкт дослідження: процес моніторингу метеорологічних параметрів на малих аеродромах.

Предмет дослідження: методи та засоби збору, синхронізації та обробки метеорологічних даних із використанням технологій кіберфізичних систем та методів машинного навчання.

Мета дослідження: розробка кіберфізичної системи моніторингу метеорологічних параметрів для малих аеродромів на підставі методів машинного навчання, яка забезпечує підвищення точності, оперативності та достовірності отримання метеорологічної інформації. 4

Завдання, які потрібно вирішити в межах роботи:

1. Провести аналіз існуючих методів збору метеорологічних даних та визначити їх особливості для малих аеродромів.
2. Дослідити підходи до інтеграції та синхронізації даних із різних джерел, включаючи відкриті інформаційні сервіси та сенсорні мережі.
3. Проаналізувати сучасні методи машинного навчання для обробки та прогнозування метеорологічних параметрів.
4. Розробити архітектуру кіберфізичної системи моніторингу метеорологічних параметрів.
5. Реалізувати програмні модулі збору, синхронізації та аналізу даних.
6. Провести оцінку ефективності запропонованої системи.

5

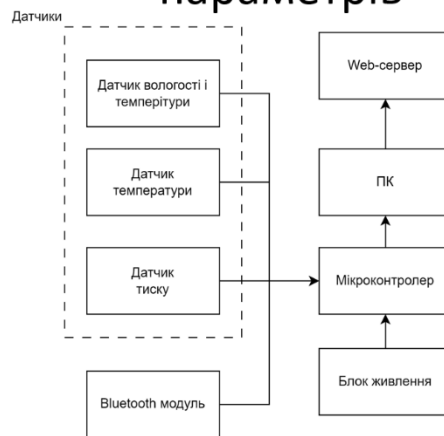
Аналіз сучасних професійних датчиків визначення метеорологічних параметрів

- Vaisala Weather Transmitter WXT530
- Campbell Scientific CR800
- Davis Vantage Pro2
- Hobo Weather Station



6

Загальна схему власного пристрою для отримання метеорологічних параметрів



7

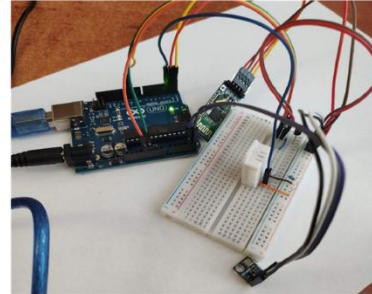
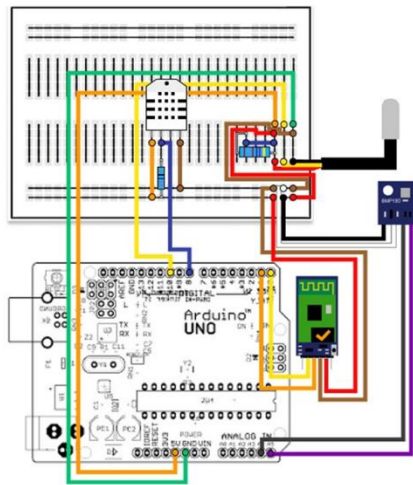
Підбір компонентів для власного пристрою

- Arduino Uno
- Датчик вологості та температури DHT21
- Датчик тиску BMP180
- Датчик температури DS18B20



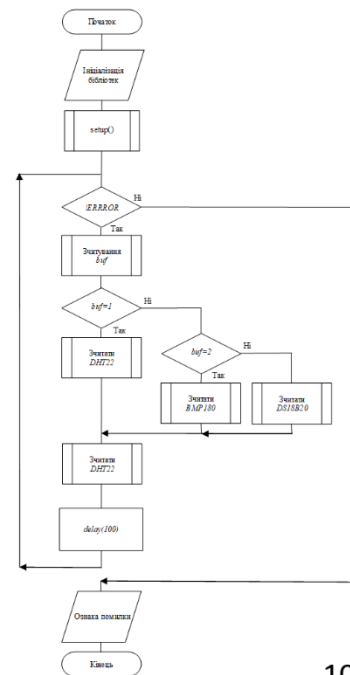
8

Схема підключення датчиків



9

Схема алгоритму опитування датчиків



10

Дерево функцій системи моніторингу даних про метеоумови для малих аеродромів



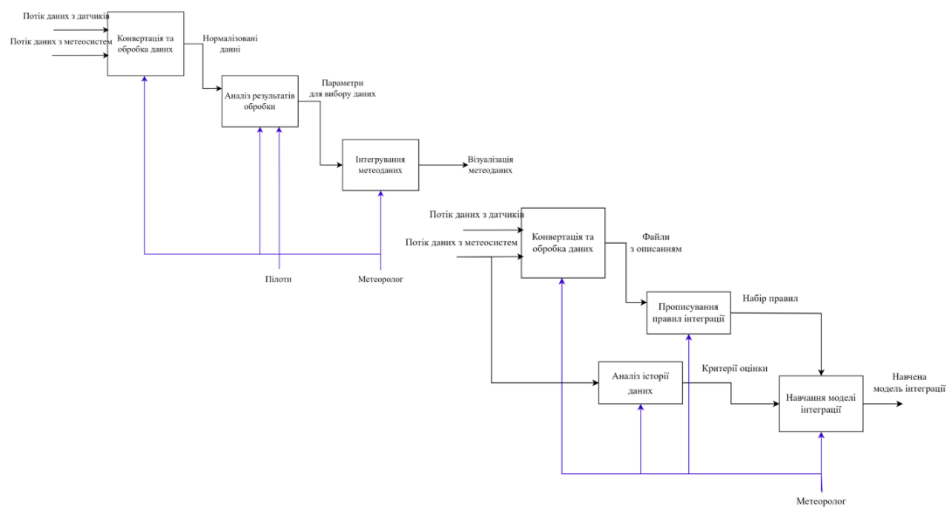
11

Контекстні діаграма системи моніторингу даних про метеоумови для малих аеродромів



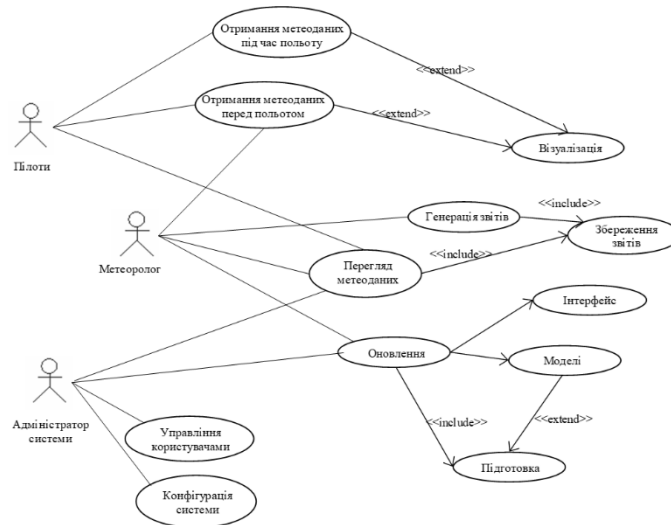
12

Діаграми IDEF0 рівень 1 процесів системи



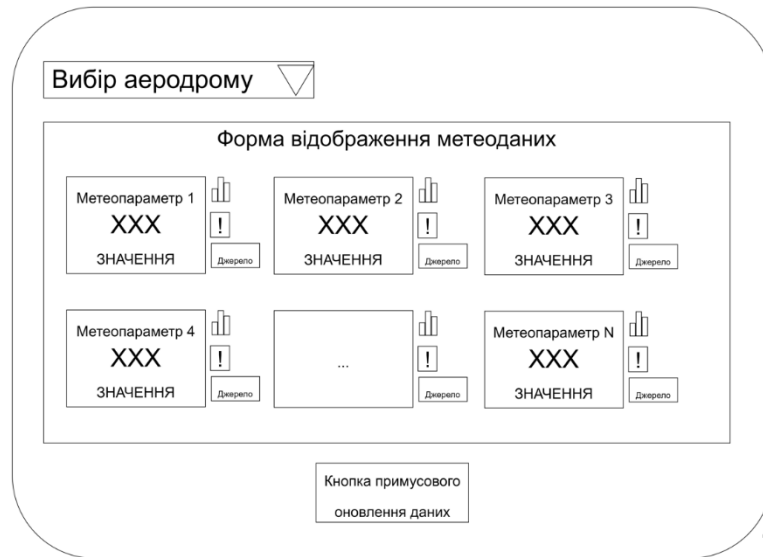
13

Діаграма використання системи



14

Проектування інтерфейсу системи



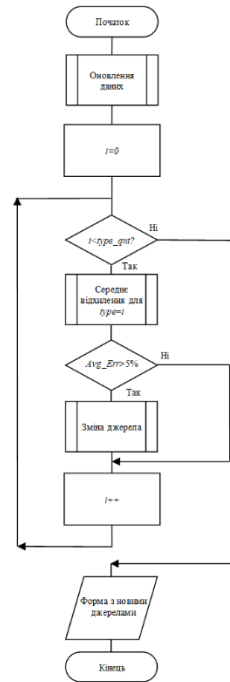
15

JSON для метеоданих

```
▼ coord:
  lon: 30.8923
  lat: 50.3402
▼ weather:
  ▼ 0:
    id: 804
    main: "Clouds"
    description: "overcast clouds"
    icon: "04d"
    base: "stations"
  ▼ main:
    temp: 274.06
    feels_like: 269.28
    temp_min: 271.89
    temp_max: 274.06
    pressure: 1021
    humidity: 92
    sea_level: 1021
    grd_level: 1005
    visibility: 10000
  ▼ wind:
    speed: 5.17
    deg: 308
    gust: 10.72
  ▼ clouds:
    all: 85
    dt: 1702632015
  ▼ sys:
    type: 2
    id: 2082717
    country: "UA"
    sunrise: 1702619380
    sunset: 1702648389
  timezone: 7200
  id: 711660
  name: "Boryspil"
  cod: 200
```

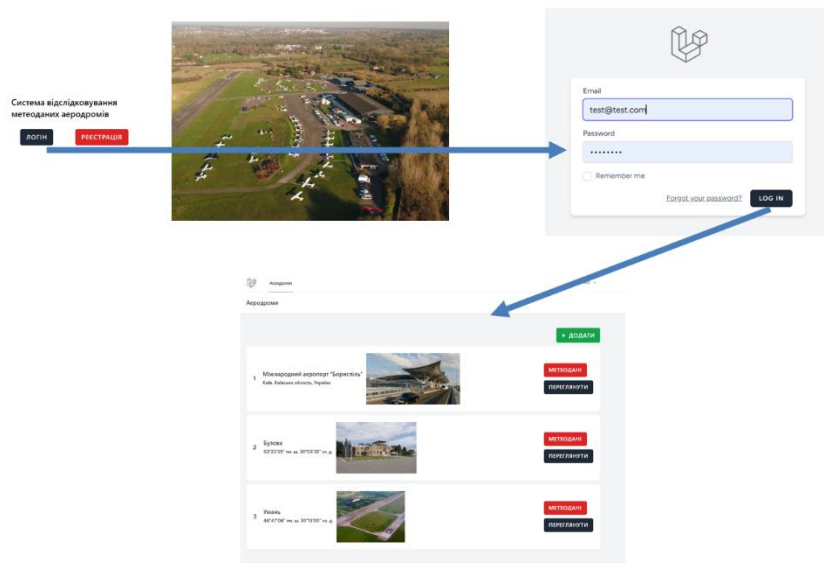
16

Схема алгоритму зміни джерел метеоданих



17

Приклад роботи системи



18

Приклад роботи системи

The screenshot displays a web interface for airport information. At the top, there is a list of airports with a 'ДОДАТИ' (ADD) button. Below this, a search form is visible with fields for 'Назва аеропорту' (Airport name), 'Аеропортний код' (Airport code), 'Розташування на карті' (Location on map), and 'Фото' (Photo). A map shows the location of Melsodani. To the right, a weather widget for Melsodani provides the following data:

Температура	Вологість	Тиск
-2	60	1022
Значення: °C	Значення: %	Значення: кг/м
Швидкість вітру	Напрямок вітру	Туманність
4.78	Кут: 332°	84
Значення: км/г	Значення: °C	Значення: %

Buttons for 'ОБНОВИТИ ДАНІ ПРЯМОСИРО' (UPDATE DATA DIRECTLY) and 'СТВОРИТИ' (CREATE) are also present.

19

Приклад роботи системи

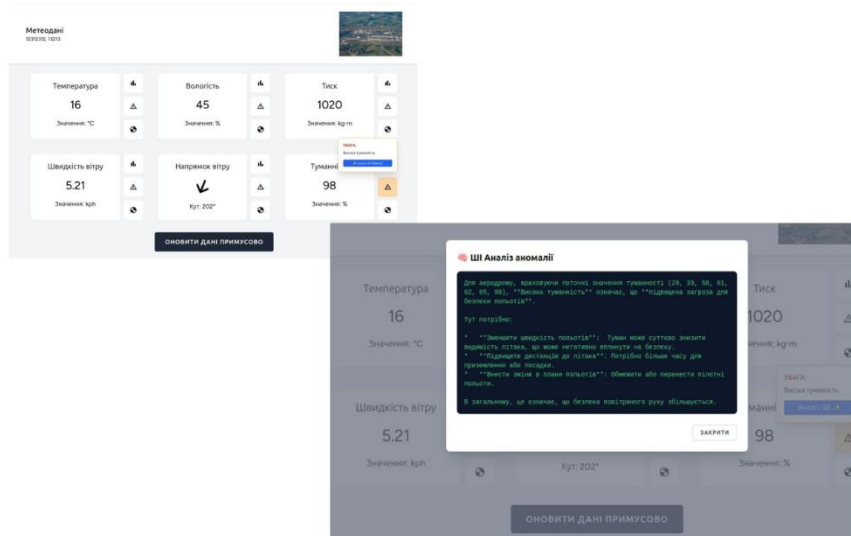
This screenshot shows the weather widget from the previous slide, with a blue arrow pointing from the 'Туманність' (Fog) value of 84 to a line graph. The graph is titled 'Графік значень' (Value Graph) and shows the fluctuation of the fog percentage over time. The y-axis is labeled 'Значення' (Value) and ranges from 300 to 320. The data points are as follows:

Значення
310
308
315
310
318
305
320
308
315
300

Additional controls for the graph include 'Відмінити' (Cancel), zoom in (+), zoom out (-), and refresh icons.

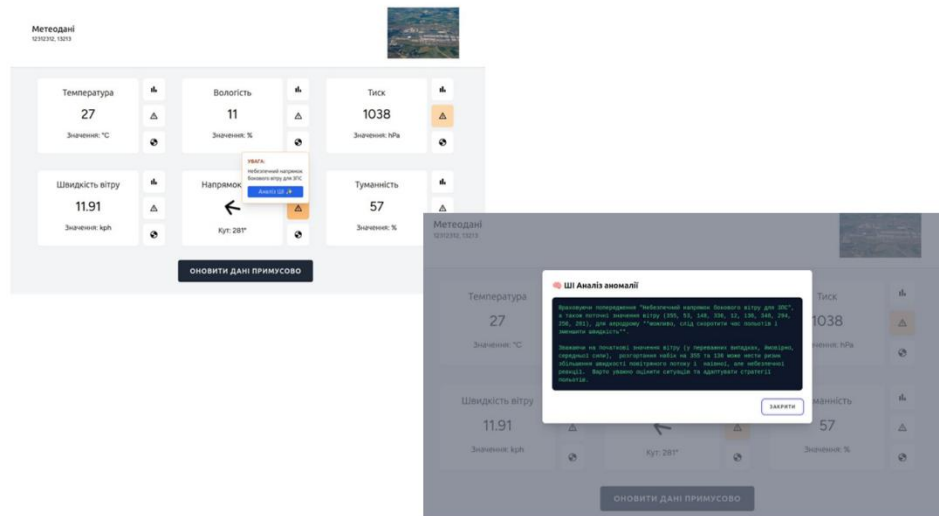
20

Тестування засобів ШІ



21

Тестування засобів ШІ



22

Висновки:

Проаналізовано:

- роль метеоданих у забезпеченні безпеки та ефективності авіаційних польотів;
- існуючі методи моніторингу метеорологічних параметрів на аеродромах;
- проблеми, пов'язані з збором, синхронізацією та доступом до метеорологічних даних на малих аеродромах.

Розроблено:

- власний пристрій для збору метеорологічних даних, в який входило як проектування пристрою, так і програмування його прошивки;
- інтегровану систему, яка полегшує інтеграцію різних джерел метеоданих на малих аеродромах з використанням машинного навчання для обробки та прогнозування метеорологічних параметрів;
- базу даних та таблиці для зберігання метеорологічних даних, інформації про джерела даних, аеродроми, користувачів, журнал подій та налаштування системи;
- програмну реалізацію методів синхронізації даних між різними джерелами;
- інтерфейс користувача для зручного доступу та управління системою.

Проведено експерименти з використання системи за різними кейсами:

- збір, обробка та аналіз метеоданих;
- зручність інтерфейсу для непідготовлених користувачів.

РЕЦЕНЗІЯ НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ МАГІСТРА

Здобувач: Валерій ЯКИМОВСЬКИЙ

Тема: Кіберфізична система моніторингу метеорологічних параметрів для малих аеродромів на підставі методів машинного навчання

Спеціальність: 123 «Комп'ютерна інженерія»

Обсяг кваліфікаційної роботи магістра:

Кількість листів креслень —; кількість сторінок записки 88

1. Короткий зміст роботи та прийнятих рішень У кваліфікаційній роботі розроблено кіберфізичну систему моніторингу метеорологічних параметрів для малих аеродромів на підставі методів машинного навчання, де запропоновано архітектуру апаратно-програмного комплексу збору, аналізу та візуалізації метеорологічних даних, а також реалізовано модулі інтелектуального аналізу та прогнозування погодних параметрів із використанням сучасних технологій штучного інтелекту.

2. Висновок про відповідність роботи дипломному завданню _____

Кваліфікаційна робота магістра відповідає виданому завданню

3. Характеристика виконання кожного розділу, ступінь використання останніх досягнень науки і техніки і передових методів роботи: У першому розділі проведено аналіз принципів моніторингу метеорологічних параметрів аеродромів. Досліджено сучасні апаратні засоби збору метеорологічних даних, методи синхронізації інформації з відкритих джерел та особливості інтеграції даних із різних метеорологічних сервісів. У другому розділі виконано розробку апаратної частини кіберфізичної системи моніторингу метеорологічних параметрів для малих аеродромів, проведено підбір та обґрунтування вибору мікроконтролерної платформи, сенсорів температури, вологості та атмосферного тиску, а також засобів бездротового обміну даними. Розроблено схеми інтеграції компонентів апаратної частини, алгоритм опитування датчиків та програмне забезпечення мікроконтролера для збору і передачі метеорологічних даних. У третьому розділі розроблено програмну частину кіберфізичної системи моніторингу метеорологічних параметрів. У четвертому розділі наведено опис розробленого користувацького інтерфейсу та

виконано тестування програмної системи. Проведено перевірку функціонування модулів збору, візуалізації та аналізу метеорологічної інформації, також досліджено роботу засобів штучного інтелекту для виявлення аномалій та формування попереджень про потенційно небезпечні метеорологічні умови.

4. Позитивні сторони роботи: Позитивною стороною роботи є комплексний підхід до розробки кіберфізичної системи моніторингу метеорологічних параметрів, який поєднує апаратні та програмні засоби, технології IoT та методи машинного навчання. Розроблена система забезпечує автоматизований збір, передачу, аналіз і візуалізацію метеорологічних даних у режимі реального часу, а також реалізацію модулів інтелектуального аналізу аномалій.

5. Негативні сторони роботи: До недоліків роботи можна віднести недостатньо детальне експериментальне оцінювання точності прогнозування метеорологічних параметрів із використанням моделей машинного навчання, а також обмежений набір сценаріїв тестування системи в реальних умовах експлуатації.

6. Оцінка графічного оформлення та пояснювальної записки роботи: -

7. Відгук про роботу в цілому: У цілому кваліфікаційна робота виконана на достатньому науково-технічному рівні, має практичне значення та демонструє вміння здобувача самостійно вирішувати задачі проєктування кіберфізичних систем моніторингу метеорологічних параметрів із використанням сучасних інформаційних технологій та методів машинного навчання.

8. Інші зауваження: -

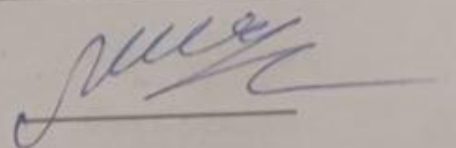
9. Оцінка кваліфікаційної роботи магістра:

Розглянувши позитивні та негативні сторони представленої кваліфікаційної роботи магістра вважаю, що робота заслуговує оцінки «добре» 75.00 (С)

Рецензент (прізвище, ім'я, по батькові, посада, місце роботи) _____

Едуард Плазюк проф. каф. КН

“ 1 ” травня 2026р.



Зав. кафедри КПС
д-р. філософії Ользі ПАВЛОВІЙ

Валерій ЯКИМОВСЬКИЙ

ГПБ здобувача вищої освіти

ФІТ, 2 курсу, групи КІ2м-24-2

ЗАЯВА

З правилами чинного Положення про систему забезпечення академічної доброчесності у Хмельницькому національному університеті, згідно з яким виявлення академічного плагіату є підставою для відмови в допуску кваліфікаційної роботи до захисту і застосування заходів академічної відповідальності, ознайомлений (а). Про використання спеціалізованих програмних засобів (СПЗ) StrikePlagiarism та Anti-Plagiarism для перевірки кваліфікаційних робіт здобувачів вищої освіти на наявність академічного плагіату оповіщений (а). Надаю університету право на передачу моєї роботи для обробки та збереження в базах даних СПЗ і використання роботи для виявлення академічного плагіату в інших роботах, які перевіряються СПЗ.

Також надаю свою згоду на обробку й збереження університетом моєї роботи в Інституційному репозитарії Хмельницького національного університету.

Робота надається для перевірки в електронному варіанті. Електронна версія моєї роботи збігається (ідентична) з друкованою.

1 травня 2026 року



РІШЕННЯ ЕКСПЕРТНОЇ КОМІСІЇ

КАФЕДРИ КОМП'ЮТЕРНОЇ ІНЖЕНЕРІЇ ТА ІНФОРМАЦІЙНИХ СИСТЕМ ПРО ДОПУСК КВАЛІФІКАЦІЙНОЇ РОБОТИ ДО ЗАХИСТУ

Назва кваліфікаційної роботи Кіберфізична система моніторингу метеорологічних параметрів для малих аеродромів на підставі методів машинного навчання

Автор Валерій ЯКИМОВСЬКИЙ

Освітня програма Комп'ютерна інженерія та програмування

Рівень вищої освіти другий (магістерський)

Спеціальність 123 Комп'ютерна інженерія

Науковий керівник: к.т.н., доцент Євген ФЕДОРОВ

На основі аналізу кваліфікаційної роботи на дотримання вимог академічної доброчесності (у т.ч. відсутності ознак академічного плагіату) з урахуванням результатів перевірки роботи спеціалізованим програмним засобом(ами) комісія зробила такий висновок:

№	Висновок	Позначка про відповідність
1	Ознаки академічного плагіату	
1.1	Запозичення, виявлені в роботі, є законними і не є академічним плагіатом (далі – зазначаються підстави віднесення запозичень до правомірних, якщо потрібно). Робота приймається до захисту.	відповідає
1.2	Виявлені запозичення не є академічним плагіатом, розміщені в розділах, які не описують безпосередньо авторське дослідження, але кількість цитат перевищує обсяг, виправданий поставленою метою роботи (далі – зазначаються детальні та аргументовані підстави віднесення запозичень до правомірних). Робота приймається до захисту, але має бути відкоригована.	
1.3	Виявлені запозичення не є академічним плагіатом, але частково розміщені в розділах, які описують безпосередньо авторське дослідження, а кількість цитат перевищує обсяг, виправданий поставленою метою роботи. Робота може бути допущена до захисту після того як буде відкоригована та доопрацьована і успішно пройде повторну перевірку на академічний плагіат.	
1.4	Робота містить навмисні текстові спотворення, передбачувані спроби укріття текстових запозичень або інші прояви академічного плагіату. Робота містить фабрикацію або фальсифікацію даних. Робота не допускається до захисту.	
2	Інші види порушень академічної доброчесності	

Підтвердження:

Запозичення, виявлені в роботі, є законними і не є плагіатом, оскільки:

- 1) усі запозичення фрагментарні, або мають належним чином оформленні посилання;
- 2) окремі виявлені збіги є загальноживаними фразами або виразами, про що свідчить посилання системи на збіг з джерелами на один фрагмент речення;
- 3) всі зафіксовані системою ознаки модифікації тексту відносяться до комбінування латинських символів зі україномовними скороченнями індексів в формулах, що не є модифікацією тексту.
- 4) значна частина знайденого плагіату відноситься до списку використаних джерел

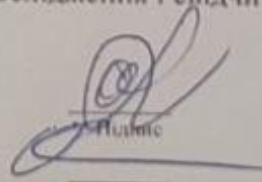
Сумарний обсяг всіх запозичень, визначений системою виявлення збігів/ ідентичності/схожості StrikePlagiarism, складає 14,17%; та системою Anti-Plagiarism складає 25%, що, з урахуванням наведених обґрунтувань, відповідає характеру наукового дослідження і свідчить на користь кваліфікаційної роботи.

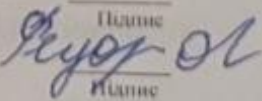
25.04.2026

Завідувач кафедри

Гарант освітньої програми

Керівник кваліфікаційної роботи


Підпис


Підпис

Ольга ПАВЛОВА
Ім'я, ПРІЗВИЩЕ

Олег САВЕНКО
Ім'я, ПРІЗВИЩЕ

Євген ФЕДОРОВ
Ім'я, ПРІЗВИЩЕ

Протокол аналізу звіту подібності експертом

Заявляю, що я ознайомився (-лась) з Повним звітом подібності, який був згенерований Системою виявлення і запобігання плагіату щодо роботи:

Автор: Валерій ЯКИМОВСЬКИЙ

Співавтор:

Назва: Кіберфізична система моніторингу метеорологічних параметрів для малих аеродромів на підставі методів машинного навчання

Експерт: Євген ФЕДОРОВ

Підрозділ: Кафедра комп'ютерної інженерії та інформаційних систем

Коефіцієнт подібності 1: 14.17%

Коефіцієнт подібності 2: 5.44%

Мікропробіли: 100

Заміна букв: 0

Інтервали: 0

Білі знаки: 6

Дата створення звіту: 2026-05-14 23:07:55.0

Після аналізу Звіту подібності констатую наступне:

- Запозичення, виявлені в роботі є законними і не є плагіатом. Рівень подібності не перевищує допустимої межі. Таким чином робота незалежна і приймається.
- Запозичення не є плагіатом, але перевищено граничне значення рівня подібностей. Таким чином робота повертається на доопрацювання.
- Виявлено запозичення і плагіат або навмисні текстові спотворення (маніпуляції), як передбачувані спроби укриття плагіату, які роблять роботу невідповідною вимогам законодавства (Ст. 32. ЗУ Про вищу освіту, пункт 3.1, Ст. 42. ЗУ Про освіту) та вимог НАЗЯВО (Критерій 5), а також кодексу етики і процедурам. Таким чином робота не приймається.

Обґрунтування:

2026-05-15

Доцент Андрій Нічепорук

Дата

експерт

Anti-Plagiarism (<http://ap.km.ua>) v-15.701**Максимальне співпадіння з одним документом 25.0%****Словники перевірки: en_US, ru_RU, ua_UA. Помилки в документах: 9%**

ID: 271507 Назва: МКР Кіберфізична система моніторингу метеорологічних параметрів для малих аеродромів на підставі методів машинного навчання Додано в БД: 2026-05-14 Автора: Валерій ЯКИМОВСЬКИЙ Керівники: Євген ФЕДОРОВ Консультанти: Опоненти:	Документ		Сумарний збіг по Базі Даних	
	Символи	Лексеми	Символи	Лексеми
	113600	885	31031 (27%)	214 (24%)

Джерело плагіату

ID	Опис	Наявність плагіату в документі	
		Символи	Лексеми
269892	Назва: Звіт з НДП Кіберфізична система моніторингу метеорологічних параметрів для малих аеродромів на підставі методів машинного навчання Додано в БД: 2026-03-21 Автора: Якимовський В.В. Керівники: Гнатчук Є.Г. Консультанти: Опоненти:	28294 (25.0%)	184 (21.0%)