Міністерство освіти і науки України

Харківський національний університет радіоелектроніки

Факультет Автоматизації, комп'ютерно-інтегрованих технологій та систем
(повна назва)

Кафедра Комп'ютерно-інтегрованих технологій, автоматизації, робототехніки та безпекової інженерії
(повна назва)

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

Пояснювальна записка

рівень вищої освіти перший (бакалаврський)

Розробка автоматизованої системи контролю параметрів навколишнього середовища у виробничих приміщеннях
(тема)

Виконала:
здобувачка 4 курсу, групи АКТСІ-22-1
Аліна ФЕСЕНКО
(прізвище, ініціали)
Спеціальності 151 Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології
(код і повна назва спеціальності)
Тип програми Освітньо-професійна
(освітньо-професійна або освітньо-наукова)
Освітня програма Системна інженерія
(повна назва освітньої програми)
Керівник доц. Світлана СОТНИК
(посада, прізвище, ініціали)

Допускається до захисту

Зав. кафедри КІТАРБІ _____ Ігор НЕВЛЮДОВ
(підпис) (прізвище, ініціали)

2026 р.

ХАРКІВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ РАДІОЕЛЕКТРОНІКИ

Факультет АКІТС
Кафедра КІТАРБІ
Рівень вищої освіти перший (бакалаврський)
Спеціальність 151 Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології
Тип програми Освітньо-професійна
Освітня програма Системна інженерія

ЗАТВЕРДЖУЮ:
Зав. кафедри _____
(підпис)
«__» _____ 2026 р.

ЗАВДАННЯ
НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ

здобувачці Фесенко Аліні Олексіївні
(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи Розробка автоматизованої системи контролю параметрів навколишнього середовища у виробничих приміщеннях
Затверджена наказом по університету від 473 СТ від 04.06.2026
2. Термін подання студентом роботи до екзаменаційної комісії 13.07.2026
3. Вхідні дані до роботи
3.1 Температура у виробничому приміщенні та ззовні;
3.2 Вологість у виробничому приміщенні та ззовні;
3.3 УФ-індекс;
3.4 Грозова активність;
3.5 Концентрація вуглекислого газу;
3.6 Атмосферний тиск.
4. Перелік питань, що потрібно розглянути у роботі
4.1 Вступ;
4.2 Огляд теми та її актуальності;
4.3 Технології для контролю параметрів навколишнього середовища;
4.4 Розробка апаратної та програмної частини;
4.5 Питання пов'язані з охороною праці;
4.6 Висновки та перелік джерел посилань.

5. Перелік графічного матеріалу із зазначенням креслеників, схем, плакатів, комп'ютерних ілюстрацій
Демонстраційний матеріал, представлений у форматі презентації PowerPoint (*.ppt) – 15 с. формату А4.

6. Консультанти розділів роботи

Найменування розділу	Консультант (посада, прізвище, ім'я, по батькові)	Позначка консультанта про виконання розділу	
		підпис	дата

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№	Назва етапів роботи	Термін виконання етапів роботи	Приміт-ка
1	Аналіз модулів для вимірювання параметрів середовища	20.04.2026 - 28.04.2026	Виконано
2	Вибір потрібних компонентів для розробки системи	29.04.2026 - 11.05.2026	Виконано
3	Вибір середовища програмування	12.05.2026 - 21.05.2026	Виконано
4	Тестування роботи системи в реальних умовах	22.05.2026 - 30.05.2026	Виконано
5	Оформлення звіту з виконаної роботи	01.06.2026 - 24.06.2026	Виконано
6	Подання роботи на нормконтроль	25.06.2026	Виконано
7	Подання роботи для перевірки на академічну доброчесність	28.06.2026	
8	Подання роботи на рецензію	01.07.2026	
9	Подання роботи на підпис зав. кафедри	04.07.2026	
10	Подання кваліфікаційної роботи до ЕК	13.07.2026	

Дата видачі завдання 20.04.2026

Здобувачка _____ Аліна ФЕСЕНКО
(підпис) (прізвище, ініціали)

Керівник роботи _____ доц. Світлана СОТНИК
(підпис) (посада, прізвище, ініціали)

Я, як студентка ХНУРЕ, розумію і підтримую політику закладу із академічної доброчесності. Я не надавала і не одержувала недозволену допомогу під час підготовки кваліфікаційної роботи. Використання ідей, результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело.

"25" червня 2026 р  Фесенко А.О.

РЕФЕРАТ

Пояснювальна записка містить: 167 с., 42 табл., 71 рис., 2 дод., 78 джерел.

МІКРОКЛІМАТ, КОНТРОЛЬ, АВТОМАТИЗАЦІЯ, ДАТЧИК, ВИРОБНИЧІ ПРИМІЩЕННЯ.

У пояснювальній записці описано розробку автоматизованої системи контролю параметрів навколишнього середовища у виробничих приміщеннях.

Мета розробки – підвищення ефективності управління технологічними процесами та забезпечення безпечних умов праці шляхом впровадження системи безперервного контролю показників мікроклімату в режимі реального часу.

Об’єкт розробки – процес контролю параметрів навколишнього середовища у виробничих приміщеннях.

Предмет розробки – автоматизована система контролю параметрів навколишнього середовища у виробничих приміщеннях.

У процесі виконання роботи застосовано методи аналізу предметної області, проєктування автоматизованих систем, структурного та алгоритмічного моделювання. Розроблена система складається з мікроконтролерних модулів, сенсорів для вимірювання параметрів мікроклімату та програмного забезпечення для обробки й відображення даних.

Система забезпечує безперервний контроль параметрів навколишнього середовища у виробничих приміщеннях, передавання даних між функціональними блоками та їх візуалізацію в інтерфейсі користувача. Вона може використовуватися у виробничих цехах, складських приміщеннях, лабораторіях, офісних зонах промислових підприємств, навчально-виробничих комплексах та інших об’єктах, де необхідно забезпечити контроль умов праці.

ABSTRACT

Explanatory note contains: 167 pages, 42 tables, 71 figures, 2 app., 78 sources.

MICROCLIMATE, CONTROL, AUTOMATION, SENSOR, PRODUCTION PREMISES.

The explanatory note describes the development of an automated system for monitoring environmental parameters in production facilities.

The purpose of the development is to increase the efficiency of technological process management and ensure safe working conditions by implementing a system for continuous monitoring of microclimate indicators in real time.

The object of the development is the process of monitoring environmental parameters in production facilities.

The subject of the development is an automated system for monitoring environmental parameters in production facilities.

In the process of performing the work, methods of subject area analysis, design of automated systems, structural and algorithmic modeling were applied. The developed system consists of microcontroller modules, sensors for measuring microclimate parameters and software for processing and displaying data.

The system provides continuous monitoring of environmental parameters in production facilities, data transfer between functional blocks and their visualization in the user interface. It can be used in production workshops, warehouses, laboratories, office areas of industrial enterprises, educational and production complexes and other facilities where it is necessary to ensure monitoring of working conditions.

ЗМІСТ

1 Аналіз предметної області та постановка задачі..…….13

1.1 Характеристика параметрів навколишнього середовища у виробничих приміщеннях..…… 13

1.2 Аналіз вимог до систем контролю мікроклімату……..…….17

1.3 Огляд сучасних технологій та засобів автоматизації контролю параметрів середовища……...20

1.4 Постановка задачі та визначення технічних вимог до системи..……. 29

2 Розробка та обґрунтування технічних рішень автоматизованої системи контролю..……32

2.1 Вибір параметрів вимірювання...……...……..32

2.2 Вибір архітектури системи контролю параметрів навколишнього середовища у виробничих приміщеннях..…… 36

2.3 Розробка структурної схеми системи контролю параметрів навколишнього середовища у виробничих приміщеннях……..…46

2.4 Розробка алгоритмів роботи системи контролю параметрів навколишнього середовища у виробничих приміщеннях..……...……..50

2.5 Вибір технічних засобів..…….…… 57

2.6 Застосування теорії автоматичного управління в системах контролю параметрів навколишнього середовища……103

3 Реалізація автоматизованої системи контролю параметрів навколишнього середовища у виробничих приміщеннях…….. 106

3.1 Вибір середовища розробки……106

3.2 Розробка схеми підключення компонентів…… 107

3.3 Розробка та 3D-моделювання корпусів внутрішнього і зовнішнього блоків…….. 113

3.4 Розробка користувацького інтерфейсу системи…… 121
3.5 Аналіз отриманих результатів та оцінка точності вимірювань……128
3.6 Оцінка впливу на умови праці та безпеку виробництва……..… 141
3.7 Охорона праці.……...145
Висновки..……..…….. 153
Перелік джерел посилань.……..…… 157
Додаток А Апробація результатів кваліфікаційної роботи…….168
Додаток Б Демонстраційний матеріал…….……..179

ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ

АС – автоматизовані системи;

БІ – безпекова інженерія;

ВБ – внутрішній блок;

ВП – виробниче приміщення;

ЗБ – зовнішній блок;

КП – контроль параметрів;

НР – нічний режим;

ПП – портативні прилади;

РРЧ – режим реального часу;

УФ – ультрафіолет.

ВСТУП

У сучасних умовах розвитку промисловості питання забезпечення безпечних та комфортних умов праці у виробничих приміщеннях набуває особливої актуальності. Параметри навколишнього середовища, зокрема температура, вологість, концентрація шкідливих газів, рівень запиленості та освітленості, безпосередньо впливають на стан здоров’я працівників, продуктивність праці, якість виготовлюваної продукції та надійність роботи технологічного обладнання. Відхилення цих параметрів від нормативних значень може призводити до професійних захворювань, аварійних ситуацій та економічних втрат.

Традиційні методи контролю мікроклімату у виробничих приміщеннях часто ґрунтуються на періодичних вимірюваннях або ручному зборі даних, що не дозволяє оперативно реагувати на зміну умов та своєчасно виявляти небезпечні відхилення. У зв’язку з цим виникає потреба у впровадженні автоматизованих систем контролю, здатних забезпечити безперервний контроль параметрів навколишнього середовища у реальному часі.

Розвиток технологій Інтернету речей (IoT), мікроконтролерних платформ, бездротових засобів зв’язку та хмарних сервісів відкриває нові можливості для створення ефективних систем контролю мікроклімату. Такі системи дозволяють не лише збирати та зберігати вимірювальні дані, але й виконувати їх аналіз, візуалізацію та формувати попереджувальні сигнали у разі виникнення небезпечних умов. Впровадження подібних рішень відповідає сучасним тенденціям розвитку промисловості та концепції «розумного виробництва» (Industry 4.0), що орієнтована на підвищення енергоефективності, автоматизацію процесів та інтеграцію цифрових технологій у виробниче середовище.

У зв’язку з вищезазначеним, розробка автоматизованої системи контролю параметрів навколишнього середовища у виробничих приміщеннях є

актуальним науково-практичним завданням, спрямованим на підвищення рівня безпеки праці, надійності виробничих процесів та ефективності управління умовами експлуатації промислових об’єктів.

Метою розробки є підвищення ефективності управління технологічними процесами та забезпечення безпечних умов праці шляхом впровадження системи безперервного контролю показників мікроклімату в режимі реального часу.

Об’єктом розробки є процес контролю параметрів навколишнього середовища у виробничих приміщеннях.

Предметом розробки є автоматизована система контролю параметрів навколишнього середовища у виробничих приміщеннях.

Для досягнення мети було визначено такі завдання:

– аналіз предметної області та постановка задачі;

– аналіз вимог до систем контролю мікроклімату;

– огляд сучасних технологій та засобів автоматизації контролю параметрів середовища;

– постановка задачі та визначення технічних вимог до системи;

– розробка та обґрунтування технічних рішень автоматизованої системи контролю;

– вибір параметрів вимірювання;

– вибір архітектури системи контролю параметрів навколишнього середовища у виробничих приміщеннях;

– розробка структурної схеми системи контролю параметрів навколишнього середовища у виробничих приміщеннях;

– розробка алгоритмів роботи системи контролю параметрів навколишнього середовища у виробничих приміщеннях;

– вибір технічних засобів;

– застосування теорії автоматичного управління в системах контролю параметрів навколишнього середовища;

– реалізація автоматизованої системи контролю параметрів навколишнього середовища у виробничих приміщеннях;

– вибір середовища розробки;

– розробка схеми підключення компонентів;

– розробка користувацького інтерфейсу системи;

– аналіз отриманих результатів та оцінка точності вимірювань;

– оцінка впливу на умови праці та безпеку виробництва;

– оформлення кваліфікаційної роботи згідно ДСТУ 3008:2015 [1], а також методичних вказівок з підготовки кваліфікаційної роботи здобувачами першого (бакалаврського) рівня вищої освіти спеціальності 151 Автоматизація та комп’ютерно-інтегровані технології освітньої програми «Системна інженерія» [2].

Отримані результати роботи можна віднести до Цілі сталого розвитку 9 «Промисловість, інновації та інфраструктура», а саме п.9.4 “Сприяти прискореному розвитку високо- та середньо-високотехнологічних секторів переробної промисловості, які формуються на основі використання ланцюгів «освіта – наука – виробництво» та кластерного підходу за напрямами: розвиток інноваційної екосистеми”, індикатор 9.4.1.

За результатами роботи було опубліковано статті у науково-технічному журналі [3-4].

1 АНАЛІЗ ПРЕДМЕТНОЇ ОБЛАСТІ ТА ПОСТАНОВКА ЗАДАЧІ

1.1 Характеристика параметрів навколишнього середовища у виробничих приміщеннях

Метою даного підрозділу є аналіз параметрів навколишнього середовища, які підлягають обов’язковому контролю у виробничих приміщеннях з метою забезпечення безпеки працівників, збереження обладнання та підвищення ефективності виробничих процесів.

Основним нормативним документом, що регламентує параметри мікроклімату виробничих приміщень, є ДСН «Санітарні норми мікроклімату виробничих приміщень» № 3.3.6.042-99, затверджені постановою Міністерства охорони здоров’я України від 01.12.99 № 42 [5]. Цей документ встановлює оптимальні і допустимі значення температури, відносної вологості та швидкості руху повітря, допустиму температуру внутрішніх поверхонь приміщення (стіни, стеля, підлоги) і зовнішніх поверхонь технологічного обладнання, а також допустиму інтенсивність теплового випромінювання нагрітих поверхонь у приміщенні та відкритих джерел тепла (нагрітий метал, скло, відкритий вогонь тощо) для робочої зони – визначеного простору, в якому знаходяться робочі місця постійного або непостійного (тимчасового) перебування працівників [6].

Основні параметри навколишнього середовища у виробничих приміщеннях умовно поділяються на фізичні, хімічні та біологічні. Кожна з цих груп чинників має безпосередній вплив на стан здоров’я працівників, надійність технологічного обладнання та якість виробничих процесів. Недотримання встановлених нормативних значень може призводити до погіршення умов праці, зниження продуктивності та виникнення аварійних ситуацій [7]. Насамперед доцільно розглянути фізичні параметри.

До фізичних параметрів навколишнього середовища належать температура повітря, відносна вологість, швидкість руху повітря, рівень освітленості, шум та вібрація [8]. Найбільш важливими з точки зору автоматизованого контролю є температура та вологість повітря, оскільки вони безпосередньо формують мікроклімат виробничого приміщення.

Температура повітря визначає тепловий комфорт працівників і впливає на фізіологічний стан людини. Надмірно висока температура може спричиняти перегрів організму, зниження концентрації уваги та швидку втому. Занадто низька температура призводить до переохолодження, зниження працездатності та підвищеного ризику простудних захворювань. Крім того, температурний режим суттєво впливає на стабільність роботи електронного та механічного обладнання, що може призводити до збоїв у технологічному процесі [3].

Відносна вологість повітря також є важливим фактором мікроклімату. Низька вологість спричиняє пересихання слизових оболонок, підвищення рівня пилу в повітрі та електростатичних зарядів. Надмірна вологість, у свою чергу, сприяє розвитку корозійних процесів, появі грибків і плісняви, а також погіршує самопочуття працівників [3].

У таблиці 1.1 наведено фізичні параметри середовища, їх опис та вплив на людину і обладнання.

Таблиця 1.1 – Фізичні параметри середовища

Параметр	Опис	Вплив на людину	Вплив на обладнання
Температура	Тепловий стан повітря	Перегрів/переохолодження	Перегрів електроніки
Вологість	Вміст водяної пари	Сухість або дискомфорт	Корозія
Освітленість	Рівень світла	Зір, продуктивність	-
Шум	Рівень звуку	Стрес	-

Наступним етапом буде аналіз хімічних параметрів.

Хімічні параметри характеризують склад повітря виробничих приміщень та наявність у ньому шкідливих або небезпечних речовин. До цієї групи належать концентрації газів, парів, аерозолів та пилу, що утворюються внаслідок технологічних процесів або життєдіяльності людини [9].

Одним із ключових показників хімічного стану повітря є концентрація вуглекислого газу (CO_2). Підвищений рівень CO_2 свідчить про недостатню вентиляцію приміщення та може викликати сонливість, зниження концентрації та загальну втому у працівників. У виробничих приміщеннях контроль цього параметра є критично важливим, особливо при великій кількості персоналу [9].

Окрім вуглекислого газу, у повітрі можуть бути присутні інші шкідливі речовини, зокрема токсичні гази (NO_2, CO), пари хімічних речовин та пил. Допустимі концентрації таких речовин визначаються нормативними документами, а їх перевищення може призводити до серйозних професійних захворювань та аварійних ситуацій [9]. У таблиці 1.2 наведено хімічні параметри середовища, їх джерело та вплив.

Таблиця 1.2 – Хімічні параметри середовища

Параметр	Джерело	Вплив
CO_2	Люди	Сонливість
CO	Згоряння	Отруєння
NO_2	Виробництво	Дихальні проблеми
Пил	Обробка матеріалів	Хвороби легень

Після цього буде здійснено розгляд біологічних параметрів.

Біологічні параметри пов’язані з наявністю в повітрі мікроорганізмів, грибків, бактерій та алергенів. Їх концентрація залежить від рівня вологості, температури, ефективності вентиляції та санітарного стану приміщення. Особливо актуальним контроль біологічних факторів є для харчових виробництв, медичних закладів, лабораторій та приміщень з підвищеними вимогами до чистоти повітря [10].

Підвищена вологість та недостатня вентиляція створюють сприятливі умови для розвитку патогенних мікроорганізмів, таких як пліснява та бактерії. Це може призводити до алергічних реакцій, інфекційних захворювань та погіршення загального стану здоров’я персоналу [10].

Автоматичний контроль біологічних факторів є складним, тому їх зазвичай оцінюють непрямо – через контроль температури, вологості та якості повітря. У таблиці 1.3 наведено біологічні параметри середовища, їх причини та наслідки.

Таблиця 1.3 – Біологічні параметри середовища

Параметр	Причина	Наслідки
Грибки (пліснява)	Вологість, погана вентиляція	Алергія, проблеми з диханням, подразнення
Бактерії	Висока вологість	Інфекційні захворювання
Алергени	Пил, мікроорганізми	Алергічні реакції, подразнення дихальних шляхів, чхання

Отже, у ході проведеного аналізу встановлено, що параметри навколишнього середовища у виробничих приміщеннях мають комплексний вплив як на здоров’я та працездатність персоналу, так і на надійність обладнання та стабільність технологічних процесів. Проведений розподіл параметрів на фізичні, хімічні та біологічні дав змогу систематизувати основні чинники ризику, визначити їх джерела, характер впливу та наслідки відхилення від нормативних значень. Таким чином, дослідження характеристик параметрів навколишнього середовища у виробничих приміщеннях показало, що ефективний контроль мікроклімату, складу повітря та санітарного стану середовища є необхідною умовою забезпечення безпечних умов праці, запобігання аварійним ситуаціям і підтримання належної якості виробництва, а також слугує основою для подальшого обґрунтування вибору засобів автоматизованого контролю параметрів середовища.

1.2 Аналіз вимог до систем контролю мікроклімату

У сучасних виробничих умовах до систем контролю параметрів мікроклімату висуваються підвищені вимоги, що зумовлено необхідністю забезпечення безпеки праці, стабільності технологічних процесів та відповідності нормативним стандартам. Ефективна система контролю повинна не лише здійснювати вимірювання параметрів навколишнього середовища, але й забезпечувати їх обробку, аналіз, збереження та передачу у зручному для користувача вигляді. Вимоги до таких систем доцільно поділяти на функціональні, технічні та експлуатаційні, кожна з яких визначає окремі аспекти роботи системи. Насамперед буде розглянуто функціональні вимоги.

Функціональні вимоги визначають, які задачі повинна виконувати система та які функції вона має реалізовувати для забезпечення ефективного контролю параметрів середовища [11]. Основною функцією системи є безперервний збір даних з датчиків, які вимірюють параметри мікроклімату, такі як температура, вологість, концентрація газів та інші показники. Отримані дані повинні передаватися до обчислювального модуля для подальшої обробки.

Обробка даних включає фільтрацію, усереднення, аналіз та порівняння отриманих значень із нормативними межами. У разі виявлення відхилень система повинна формувати відповідні сигнали або повідомлення для користувача.

Важливою функцією є збереження даних у базі даних або хмарному середовищі для подальшого аналізу та формування статистики. Це дозволяє відслідковувати зміни параметрів у часі та приймати обґрунтовані рішення [12].

Система також повинна відображати дані у вигляді графіків, таблиць або індикаторів у зручному інтерфейсі користувача. Це значно спрощує сприйняття інформації та підвищує ефективність контролю. Ще однією важливою функцією є підтримка роботи в автономному режимі від акумуляторного джерела живлення [12].

Окрім цього, важливою функцією є передача даних через мережу (локальну або глобальну), що дозволяє здійснювати віддалений контроль та управління системою.

У таблиці 1.4 наведено функціональні вимоги до системи.

Таблиця 1.4 – Функціональні вимоги до системи

Функція	Опис
Збір даних	Отримання інформації з датчиків у реальному часі
Обробка даних	Аналіз, фільтрація та порівняння з нормами
Збереження	Запис даних у базу або хмару
Передача	Надсилання даних через мережу
Візуалізація	Відображення у вигляді графіків та таблиць
Сигналізація	Сповіщення при відхиленнях

Далі буде проведено аналіз технічних вимог.

Технічні вимоги визначають, якою має бути система з точки зору апаратної та програмної реалізації, щоб забезпечити її ефективну та надійну роботу.

Апаратна частина системи повинна забезпечувати точне та стабільне вимірювання параметрів середовища. Однією з основних вимог є точність вимірювань, яка повинна відповідати нормативним документам. Наприклад, для температури допустима похибка зазвичай становить приблизно 0,5 °C, а для вологості – від 2 % до 5 %. Не менш важливою є надійність обладнання. Датчики та електронні компоненти повинні мати відповідний ступінь захисту (IP-рейтинг), що дозволяє працювати у складних умовах виробництва, таких як підвищена вологість, пил або вібрації. Система повинна підтримувати різні способи передачі даних. Це можуть бути як провідні інтерфейси (Ethernet, RS-485), так і бездротові технології (Wi-Fi, LoRaWAN, Zigbee). Вибір інтерфейсу залежить від умов експлуатації та необхідної дальності передачі [4].

Для бездротових датчиків важливою є автономність роботи. Система повинна забезпечувати тривалий час роботи від акумуляторів або батарей, що особливо актуально для розподілених систем контролю.

У таблиці 1.5 наведено технічні вимоги до апаратної частини.

Таблиця 1.5 – Технічні вимоги до апаратної частини

Параметр	Опис
Точність вимірювань	Температура приблизно 0,5 °C, вологість від 2 % до 5 %
Надійність	Робота в умовах пилу, вологи, вібрацій
Захист	IP65 і вище
Мережева архітектура	Ethernet, RS-485, Wi-Fi, LoRa
Автономність	Тривала робота від батареї

Програмна частина системи повинна забезпечувати зручну взаємодію користувача з системою, а також обробку та збереження даних.

Однією з ключових вимог є зручність інтерфейсу. Користувач повинен мати можливість легко отримувати інформацію про стан середовища без необхідності спеціальної підготовки. Масштабованість є важливою характеристикою сучасних систем. Система повинна дозволяти додавання нових датчиків, модулів або функцій без суттєвої зміни архітектури. Безпека також є критично важливою. Необхідно забезпечити захист даних та доступу до системи шляхом використання механізмів авторизації та розмежування прав доступу. У таблиці 1.6 наведено технічні вимоги до програмної частини.

Таблиця 1.6 – Технічні вимоги до програмної частини

Параметр	Вимога
Зручність інтерфейсу	Простий та зрозумілий
Масштабованість	Легке додавання нових модулів
Безпека	Авторизація та контроль доступу
Обробка даних	Аналіз та збереження інформації

Після цього буде здійснено розгляд експлуатаційних вимог.

Експлуатаційні вимоги визначають, як система повинна працювати у реальних умовах використання та наскільки вона зручна для обслуговування.

Однією з ключових характеристик є надійність та безвідмовність роботи системи. Вона повинна забезпечувати тривалий час безперервної роботи без збоїв, що оцінюється показником середнього часу напрацювання на відмову (MTBF) [13].

Система повинна бути простою в обслуговуванні. Це включає легкість калібрування датчиків, заміни компонентів та оновлення програмного забезпечення. Також система повинна бути легкою у встановленні та налаштуванні, з чіткими інструкціями для користувачів [14]. Енергоефективність є важливою для зниження витрат на експлуатацію та забезпечення автономної роботи. Особливо це актуально для бездротових систем, які працюють від акумуляторів.

У таблиці 1.7 наведено експлуатаційні вимоги до системи.

Таблиця 1.7 – Експлуатаційні вимоги до системи

Параметр	Опис
Надійність та безвідмовність	Високий час напрацювання на відмову (MTBF), мінімальна кількість збоїв
Простота обслуговування	Легкість калібрування датчиків, заміни модулів, оновлення програмного забезпечення
Енергоефективність	Низьке енергоспоживання обладнання

1.3 Огляд сучасних технологій та засобів автоматизації контролю параметрів середовища

У сучасних умовах розвитку автоматизації та цифрових технологій системи контролю параметрів навколишнього середовища будуються на основі концепції Інтернету речей (IoT).

Інтернет речей – це процес передачі даних між будь-якими фізичними пристроями. Щоб налаштувати IoT-інфраструктуру необхідно мати:

– розумні датчики та сенсори, оснащені спеціальними IoT-картками;
– IoT-платформу для керування, збору та обробки даних;
– мережу для зв’язку пристроїв між собою та з платформою [15].

Інтернет речей забезпечує збір інформації з розумних пристроїв, оснащених датчиками та сенсорами, та передає її до хмарного сховища. Відповідне програмне забезпечення виконує подальший аналіз отриманих відомостей [15].

Ключовою особливістю IoT-систем є організація безперервного обміну інформацією між їх елементами – від датчиків до кінцевого користувача. Дані проходять кілька етапів обробки: від первинного вимірювання до передачі, аналізу та візуалізації.

З точки зору побудови таких систем, важливим є розуміння їх архітектури. Як правило, сучасні системи контролю параметрів середовища мають багаторівневу структуру, що включає рівень сприйняття, мережевий рівень та рівень обробки даних.

Для початку буде розглянуто архітектуру систем контролю.

Функціонування систем контролю параметрів навколишнього середовища базується на послідовному проходженні даних через кілька рівнів обробки. На першому етапі датчики здійснюють вимірювання фізичних параметрів середовища. Отримані значення передаються через мережеві канали зв’язку до обчислювального вузла або сервера. Далі дані обробляються, зберігаються та відображаються користувачу у зручному вигляді. Такий підхід дозволяє забезпечити безперервний контроль параметрів середовища та оперативне реагування на їх зміну [16].

Далі розглянемо детальніше багаторівневу структуру сучасних систем контролю параметрів середовища:

– рівень сприйняття відповідає за отримання інформації про стан навколишнього середовища. На цьому рівні використовуються датчики та

сенсори, що вимірюють температуру, вологість, тиск, концентрацію газів та інші параметри;

– мережевий рівень забезпечує передачу даних від датчиків до обчислювальних вузлів. Для цього використовуються різні технології зв’язку, зокрема Wi-Fi, LoRaWAN, ZigBee або мобільні мережі. Вибір технології залежить від дальності передачі, енергоспоживання та умов експлуатації системи;

– рівень обробки даних відповідає за аналіз, збереження та візуалізацію інформації. У сучасних системах використовуються хмарні та граничні обчислення. Перший підхід передбачає обробку даних на віддалених серверах, а другий – безпосередньо на пристрої або поблизу джерела даних.

У таблиці 1.8 наведено рівні архітектури IoT системи.

Таблиця 1.8 – Рівні архітектури IoT системи

Рівень	Опис
Рівень сприйняття	Збір даних за допомогою датчиків
Мережевий рівень	Передача даних від датчиків до обчислювальних вузлів
Рівень обробки	Аналіз, збереження та візуалізація інформації

Після розгляду загальної архітектури систем контролю доцільно детальніше проаналізувати основні складові таких систем, а саме сенсорні технології, мікроконтролерні платформи та засоби передачі даних.

Першочергово буде розглянуто сенсорні технології.

Сенсорні технології охоплюють пристрої та методи для взаємодії з навколишнім середовищем через датчики, що реагують на дотик, звук, світло або рух. Сучасні сенсори відрізняються високою точністю, малим енергоспоживанням та компактними розмірами. Найбільш поширеними є цифрові датчики, які передають дані через інтерфейси I2C, SPI або UART.

У таблиці 1.9 наведено сучасні датчики параметрів середовища [17].

Таблиця 1.9 – Сучасні датчики параметрів середовища

Датчик	Параметри	Особливості
DHT22	Температура, вологість	Дешевий, середня точність
BME280	Температура, вологість, тиск	Висока точність
SHT30/SHT40	Температура, вологість	Дуже точні
MQ-135	CO_2, гази	Дешевий, потребує калібрування
MH-Z19B	CO_2	Висока точність

Таким чином, сенсорні технології забезпечують первинне отримання інформації про параметри навколишнього середовища. Однак для подальшої обробки та передачі цих даних необхідні обчислювальні пристрої, роль яких виконують мікроконтролери.

Наступним кроком розглянемо мікроконтролерні платформи.

Мікроконтролерні платформи – це апаратно-програмні комплекси на базі однокристальних ЕОМ, призначені для швидкої розробки прототипів, роботизованих систем, інтернет-речей (IoT) та автоматизації.

Для обробки даних із сенсорів використовуються мікроконтролери, які забезпечують збір, обробку та передачу інформації. Найпопулярніші платформи включають Arduino (для початківців), STM32 (для професійних високошвидкісних задач), ESP32/ESP8266 (з Wi-Fi/Bluetooth) та Raspberry Pi Pico. Мікроконтролери Arduino, ESP8266 та ESP32 поєднують низьку вартість, простоту використання та достатню обчислювальну потужність [18].

У таблиці 1.10 наведено характеристики мікроконтролерів.

Таблиця 1.10 – Характеристики мікроконтролерів

Платформа	Особливості	Переваги
Arduino Uno	Простий	Підходить для початківців
Arduino Pro Mini	Енергоефективний	Для автономних систем
ESP8266	Wi-Fi	Дешевий IoT
ESP32	Wi-Fi + Bluetooth	Потужний

Мікроконтролери забезпечують обробку даних та їх підготовку до передачі. Наступним важливим елементом системи є засоби зв’язку, які дозволяють передавати дані між вузлами системи та до кінцевого користувача.

Передача даних є ключовим елементом систем контролю. Вибір технології залежить від дальності, енергоспоживання та умов експлуатації. У таблиці 1.11 наведено порівняння дальності дії бездротових технологій.

Таблиця 1.11 – Порівняння дальності дії бездротових технологій

Технологія	Відкрита місцевість	Місто	Промислові приміщення	Максимальна швидкість
Wi-Fi 5 (802.11ac)	від 200 м до 300 м	від 50 м до 100 м	від 30 м до 80 м	3,5 Гбіт/с
Wi-Fi 6 (802.11ax)	від 300 м до 500 м	від 100 м до 200 м	від 50 м до 150 м	9,6 Гбіт/с
Bluetooth 6.1/5.4	від 200 м до 240 м	від 50 м до 100 м	від 30 м до 60 м	2 Мбіт/с
LoRaWAN	від 15 км до 20 км	від 2 км до 5 км	від 500 м до 2 км	від 0,3 кбіт/с до 27 кбіт/с
Zigbee 3.0	від 100 м до 300 м	від 30 м до 100 м	від 10 м до 50 м	250 кбіт/с
Z-Wave	від 100 м до 200 м	від 30 м до 80 м	від 10 м до 40 м	100 кбіт/с

У таблиці 1.12 наведено технічні характеристики бездротових технологій за частотами та стандартами.

Таблиця 1.12 – Технічні характеристики бездротових технологій за частотами та стандартами

Технологія	Частота	Потужність передавача	Чутливість приймача	Топологія мережі
Wi-Fi 6	2,4 ГГц, 5 ГГц, 6 ГГц	від 20 дБм до 30 дБм	-96 дБм	Зірка/BSS
Bluetooth 6.1/5.4	2,4 ГГц (2402-2480 МГц)	від 4 дБм до 20 дБм	-103 дБм	Пікомережа/Mesh
LoRaWAN	868 МГц (EU), 915 МГц (US)	від 14 дБм до 25 дБм	-148 дБм	Зірка
Zigbee 3.0	2,4 ГГц, 868/915 МГц	від 0 дБм до 20 дБм	-100 дБм	Mesh/Зірка
Z-Wave	868,4 МГц (EU), 908,4 МГц (US)	від 1 дБм до 10 дБм	-104 дБм	Mesh

У таблиці 1.13 наведено промислові застосування бездротових технологій по галузях.

Таблиця 1.13 – Промислові застосування бездротових технологій по галузях

Галузь	Рекомендована технологія	Дальність	Типові застосування
Нафтогазова	LoRaWAN	від 5 км до 15 км	Контроль трубопроводів, віддалені свердловини
Металургія	Wi-Fi 6	від 100 м до 500 м	Автоматизація виробництва, контроль якості
Логістика/Склади	Wi-Fi 6 + Bluetooth	від 50 м до 300 м	Відстеження товарів, автоматизація складів
Розумні будинки	ZigBee + Wi-Fi	від 30 м до 200 м	Системи HVAC, освітлення, безпека

У таблиці 1.14 наведено енергоспоживання та автономність роботи бездротових технологій.

Таблиця 1.14 – Енергоспоживання та автономність роботи бездротових технологій

Технологія	Режим передачі	Режим очікування	Автономність (батарея 2000 мАг)	Режими енергозбереження
Wi-Fi 6	від 150 мА до 300 мА	від 5-20 мА	від 3 днів до 30 днів	Power Save Mode, TWT
Bluetooth 6.1/5.4 LE	від 8 мА до 15 мА	від 0,3 мкА до 2 мкА	від 1 року до 4 років	Enhanced Sleep, Deep sleep
LoRaWAN	від 20 мА до 150 мА	від 1 мкА до 10 мкА	від 5 років до 15 років	Class A, B, C
Zigbee 3.0	від 15 мА до 30 мА	від 1 мкА до 5 мкА	від 2 років до 5 років	Sleep mode, Coordinator
Z-Wave	від 25 мА до 40 мА	від 1 мкА до 5 мкА	від 1 року до 3 років	Sleep mode, FLiRS

Таким чином, технології передачі даних забезпечують доставку інформації від датчиків до обчислювальних систем. Однак для повноцінного функціонування системи контролю необхідно забезпечити не лише передачу, а й збереження, обробку та зручне відображення отриманих даних користувачу.

Для реалізації цих функцій використовуються програмні рішення та IoT платформи, які забезпечують централізоване керування системою, аналіз інформації та візуалізацію результатів. Такі платформи можуть бути реалізовані як на базі локальних серверів, так і з використанням хмарних технологій.

Основними функціями таких платформ є: збереження даних; побудова графіків та аналітичних залежностей; забезпечення віддаленого доступу до системи; формування сповіщень про відхилення параметрів від нормативних значень; забезпечення управління життєвим циклом пристроїв; забезпечення

комунікації між пристроями; аналітична обробка даних та інтеграція з іншими сервісами [19].

Для реалізації зазначених функцій у системах контролю параметрів навколишнього середовища можуть використовуватися сучасні програмні платформи, зокрема Blynk і Node-RED. Їх застосування дає змогу забезпечити взаємодію між апаратною частиною системи, засобами передавання даних і користувацьким інтерфейсом.

Платформа Blynk є інтегрованим програмним середовищем для створення та керування IoT-системами. Вона дає змогу організувати віддалену взаємодію з підключеними пристроями, відображення даних датчиків, керування параметрами системи через мобільні та вебзастосунки, а також надсилання сповіщень користувачу. До складу платформи входять мобільний застосунок, серверна частина, яка відповідає за обмін даними між пристроєм і користувачем, а також бібліотеки для популярних апаратних платформ. Перевагою Blynk є можливість швидкого створення інтерфейсу системи контролю, організації дистанційного доступу та візуалізації поточних значень контрольованих параметрів [20].

Платформа Node-RED є інструментом візуального програмування, побудованим на основі Node.js, який використовується для організації потоків даних між різними пристроями, API та онлайн-сервісами. Робота в Node-RED виконується через браузерний редактор, у якому логіка системи формується з окремих функціональних вузлів. Це дає змогу реалізувати збір, обробку, фільтрацію, пересилання та візуалізацію даних без створення складного програмного коду. Додатковою перевагою є можливість розширення функціональності за рахунок готових модулів або створення власних вузлів відповідно до потреб конкретної системи [21].

Отже, використання Blynk та Node-RED у системах контролю дає змогу реалізувати основні функції програмної частини, а саме віддалений контроль, обробку даних, їх візуалізацію та інтеграцію між окремими компонентами системи. Вибір конкретної платформи визначається вимогами до

функціональності, масштабованості, зручності використання та особливостями реалізації автоматизованої системи контролю параметрів навколишнього середовища у виробничих приміщеннях.

На завершення аналізу доцільно розглянути існуючі системи контролю параметрів навколишнього середовища, що вже представлені на ринку.

Серед готових рішень можна виділити систему Awair Element, яка призначена для контролю якості повітря та забезпечує контроль таких параметрів, як температура, вологість і концентрація вуглекислого газу. Перевагою цього рішення є висока точність вимірювань і зручність використання, однак його недоліком є досить висока вартість, що може обмежувати доцільність застосування в окремих випадках.

Ще одним прикладом є системи, побудовані на базі платформи Tuya. Вони забезпечують віддалений доступ до даних, підтримують мобільні застосунки та хмарні сервіси, а також дозволяють реалізувати базовий контроль параметрів середовища. Їх перевагою є простота впровадження та зручність для користувача. Водночас такі системи часто мають обмежену гнучкість налаштування, оскільки значною мірою залежать від готової екосистеми виробника.

Окрему групу становлять рішення, побудовані на базі Arduino та інших мікроконтролерних платформ. Їх основною перевагою є висока гнучкість, оскільки вони дозволяють адаптувати систему до конкретних умов використання, самостійно обирати датчики, засоби передавання даних та спосіб відображення інформації. Разом з тим такі рішення потребують повноцінної розробки апаратної та програмної частин, що ускладнює їх реалізацію порівняно з готовими комерційними системами.

Також поширення набули сучасні IoT-системи контролю, що поєднують сенсори, мікроконтролери, хмарні сервіси та веб- або мобільні інтерфейси. Їх перевагою є можливість віддаленого доступу, централізованого збору даних, аналітики та інтеграції з іншими сервісами. Проте такі системи є складнішими в

налаштуванні та обслуговуванні, а їх ефективна реалізація вимагає врахування багатьох технічних аспектів.

Отже, аналіз існуючих рішень показує, що готові системи забезпечують зручність використання та швидке впровадження, проте можуть мати високу вартість, обмежену гнучкість або складність інтеграції. У свою чергу, розробка власної автоматизованої системи контролю параметрів навколишнього середовища у виробничих приміщеннях дає змогу врахувати конкретні вимоги до функціональності, способу передавання даних, візуалізації результатів і умов експлуатації.

1.4 Постановка задачі та визначення технічних вимог до системи

На основі проведеного аналізу параметрів навколишнього середовища у виробничих приміщеннях, вимог до систем контролю та огляду сучасних технологій встановлено, що ефективний контроль мікроклімату є критично важливим для забезпечення безпеки праці, стабільності технологічних процесів та збереження обладнання.

Аналіз показав, що у більшості виробничих приміщень контроль параметрів навколишнього середовища здійснюється періодично або вручну, що не дозволяє оперативно реагувати на зміну умов. Це призводить до затримки виявлення відхилень від нормативних значень, підвищення ризику виникнення аварійних ситуацій, зниження продуктивності праці та погіршення стану здоров’я працівників.

Існуючі готові рішення, розглянуті у попередньому підрозділі, хоча і забезпечують базовий функціонал контролю, мають ряд недоліків, таких як висока вартість, обмежена гнучкість, залежність від виробника та складність адаптації до конкретних умов виробництва. Це обґрунтовує доцільність розробки власної автоматизованої системи контролю параметрів навколишнього середовища.

Основною метою даної розробки є підвищення ефективності управління технологічними процесами та забезпечення безпечних умов праці шляхом впровадження системи безперервного контролю показників мікроклімату в режимі реального часу. Розроблювана система повинна забезпечувати:

– безперервний контроль параметрів навколишнього середовища, зокрема температури, відносної вологості, концентрації вуглекислого газу та інших показників мікроклімату;

– збір даних із сенсорних пристроїв з високою точністю та стабільністю;

– обробку отриманих даних, включаючи фільтрацію, аналіз та порівняння з нормативними значеннями;

– передавання даних на центральний пристрій або сервер за допомогою сучасних засобів зв’язку;

– візуалізацію параметрів у зручному інтерфейсі користувача у вигляді графіків, таблиць або індикаторів;

– формування попереджень або сигналів у разі виходу параметрів за допустимі межі.

На основі поставленої задачі визначено основні функціональні можливості системи, які повинні забезпечити її ефективну роботу. Система повинна працювати у режимі реального часу та забезпечувати безперервний цикл вимірювання, обробки та передачі даних. Важливою характеристикою є можливість інтеграції з різними типами сенсорів та розширення системи без значних змін у її структурі. Також система повинна забезпечувати зручну взаємодію з користувачем, надаючи актуальну інформацію про стан середовища та сигналізуючи про небезпечні відхилення.

На рисунку 1.1 наведено основні функціональні можливості системи.

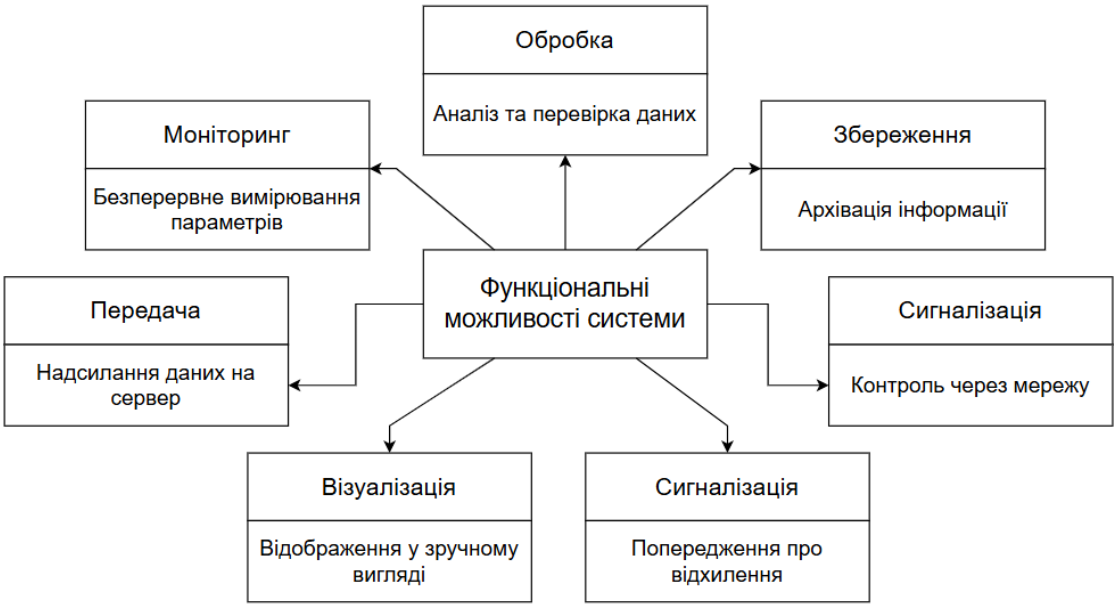


Рисунок 1.1 – Основні функціональні можливості системи

Для реалізації поставленої задачі система повинна відповідати ряду технічних вимог, що забезпечують її точність, надійність та ефективність.

Апаратна частина системи повинна забезпечувати точне вимірювання параметрів середовища відповідно до нормативних вимог, бути стійкою до впливу зовнішніх факторів та підтримувати необхідні інтерфейси зв’язку. Програмна частина повинна забезпечувати обробку даних, їх візуалізацію та захищеність системи.

У таблиці 1.15 наведено узагальнені технічні вимоги до системи.

Таблиця 1.15 – Узагальнені технічні вимоги до системи

Категорія	Вимога
Точність	Відповідність нормативним значенням
Надійність	Стабільна цілодобова робота
Захищеність системи	Стійкість до пилу, вологи
Зв’язок	Підтримка дротових і бездротових технологій
Автономність	Можливість автономної роботи
Масштабованість	Розширення системи

2 РОЗРОБКА ТА ОБҐРУНТУВАННЯ ТЕХНІЧНИХ РІШЕНЬ АВТОМАТИЗОВАНОЇ СИСТЕМИ КОНТРОЛЮ

2.1 Вибір параметрів вимірювання

Одним із ключових етапів проєктування автоматизованої системи контролю параметрів навколишнього середовища є вибір параметрів, які підлягають вимірюванню. Від правильності цього вибору залежить ефективність роботи системи, точність оцінки мікроклімату та можливість своєчасного реагування на небезпечні відхилення.

На основі аналізу, проведеного у першому розділі, встановлено, що параметри навколишнього середовища у виробничих приміщеннях можуть належати до фізичних, хімічних та біологічних чинників. Однак у межах розроблюваної системи доцільно зосередитися на тих показниках, які можуть бути виміряні доступними сенсорними засобами, мають практичне значення для оцінки умов праці та дозволяють контролювати як внутрішній стан приміщення, так і додаткові зовнішні умови.

У даній роботі параметри вимірювання доцільно поділити на три групи: основні параметри виробничого приміщення, зовнішні параметри та службові параметри стану системи.

Спочатку буде обґрунтовано вибір параметрів, що контролюються внутрішнім блоком системи. До основних параметрів приміщення належать температура повітря, відносна вологість, атмосферний тиск, концентрація вуглекислого газу та рівень освітленості. Саме ці показники безпосередньо характеризують умови перебування людини у приміщенні, якість повітря, ефективність вентиляції та комфортність робочого середовища.

Температура повітря є одним із базових показників мікроклімату, оскільки вона визначає тепловий комфорт працівників і впливає на стабільність роботи обладнання. Відхилення температури від допустимих значень може

призводити до перегріву або переохолодження організму, зниження працездатності та погіршення умов праці. Крім того, температурний режим має значення для електронних компонентів і технологічного обладнання, робота яких може погіршуватися за несприятливих температурних умов.

Відносна вологість повітря також є важливим параметром мікроклімату. Надмірно низька вологість може спричиняти пересихання слизових оболонок, підвищення рівня пилу та накопичення статичної електрики. Підвищена вологість, у свою чергу, сприяє розвитку корозійних процесів, появі грибків і плісняви, а також може негативно впливати на матеріали та обладнання.

Концентрація вуглекислого газу є важливим показником якості повітря та ефективності вентиляції. Підвищений рівень CO_2 може свідчити про недостатній повітрообмін у приміщенні.

Атмосферний тиск використовується як додатковий фізичний параметр для оцінки загального стану середовища. Його контроль дозволяє отримати більш повну картину умов у приміщенні та може бути корисним для аналізу змін погоди, вентиляційних процесів або герметичності приміщення.

Рівень освітленості обрано як додатковий параметр, що впливає на комфортність роботи та зорове навантаження працівників. Недостатнє освітлення може знижувати продуктивність, підвищувати втому очей і погіршувати безпеку виконання робіт. У межах розроблюваної системи контроль освітленості також може використовуватися для автоматичного регулювання яскравості дисплея внутрішнього блока, що підвищує зручність користування пристроєм.

Окрім параметрів усередині приміщення, система передбачає отримання даних від зовнішнього блока. Це дозволяє порівнювати внутрішні та зовнішні умови, а також отримувати додаткову інформацію про стан навколишнього середовища. До зовнішніх параметрів належать температура, відносна вологість, УФ-індекс та наявність грозової активності.

Зовнішня температура та вологість дають змогу оцінювати вплив погодних умов на стан виробничого приміщення. Ці дані можуть бути

корисними для аналізу ефективності провітрювання, роботи вентиляції та зміни мікроклімату всередині приміщення залежно від зовнішніх умов.

УФ-індекс використовується як додатковий параметр контролю зовнішнього середовища, що має значення для умов виконання 3D-друку з фотополімерних матеріалів. Фотополімери є чутливими до УФ-випромінювання, оскільки саме під його дією відбувається процес полімеризації матеріалу. Тому надмірний вплив сонячного або штучного УФ-випромінювання може призводити до передчасного затвердіння фотополімеру, погіршення якості друку, зміни властивостей матеріалу або порушення умов його зберігання. Контроль УФ-індексу дозволяє оцінювати зовнішні умови, що можуть впливати на приміщення, розміщення матеріалів та безпечність виконання технологічного процесу.

Наявність грозової активності також належить до додаткових зовнішніх показників. Її контроль дозволяє фіксувати потенційно небезпечні атмосферні явища, які можуть впливати на роботу електронних пристроїв, стабільність живлення та безпечність експлуатації обладнання. У системі цей параметр може використовуватися не як постійний показник мікроклімату, а як інформаційний індикатор зовнішньої небезпеки.

Окрему групу становлять службові параметри, які не характеризують безпосередньо мікроклімат, але необхідні для контролю працездатності системи. До них належать напруга акумулятора, струм споживання або заряджання зовнішнього блока, а також рівень сигналу бездротового зв’язку. Контроль цих параметрів дозволяє оцінювати стан автономного живлення, своєчасно виявляти розряд акумулятора та контролювати стабільність передавання даних між блоками системи.

У таблиці 2.1 наведено перелік параметрів, що контролюються системою.

Таблиця 2.1 – Перелік параметрів, що контролюються системою

Параметр	Одиниця вимірювання	Причина вибору	Блок системи
Температура	°C	Оцінка теплового стану середовища та умов праці	Зовнішній, внутрішній
Відносна вологість	%	Контроль вологості, ризику пересушення повітря, корозії та появи плісняви	Зовнішній, внутрішній
Концентрація CO_2	ppm	Оцінка якості повітря та ефективності вентиляції	Внутрішній
Атмосферний тиск	hPa	Додаткова оцінка стану середовища та змін погодних умов	Внутрішній
Освітленість	lx	Оцінка рівня освітлення та можливість автоматичного регулювання яскравості дисплея	Внутрішній
УФ-індекс	UV index	Оцінювання рівня УФ-випромінювання	Зовнішній
Грозова активність	Факт виявлення, відстань до грози (km)	Фіксація потенційно небезпечних атмосферних явищ	Зовнішній
Напруга акумулятора	V	Контроль стану автономного живлення	Зовнішній
Струм заряджання або споживання	mA	Оцінка енергоспоживання та роботи системи живлення	Зовнішній
Рівень радіосигналу	dBm	Контроль стабільності бездротового зв’язку між блоками	Зовнішній, внутрішній

Таким чином, вибір параметрів вимірювання не обмежується лише базовими показниками мікроклімату. Розроблювана система повинна забезпечувати комплексний контроль стану виробничого приміщення, зовнішніх умов і технічного стану окремих модулів. Такий підхід підвищує інформативність системи, розширює її функціональні можливості та дозволяє використовувати отримані дані для подальшого аналізу умов експлуатації.

2.2 Вибір архітектури системи контролю параметрів навколишнього середовища у виробничих приміщеннях

Вибір архітектури автоматизованої системи контролю параметрів навколишнього середовища є важливим етапом проєктування, оскільки саме архітектура визначає спосіб взаємодії між сенсорними модулями, обчислювальними пристроями, каналами зв’язку та інтерфейсом користувача. Від правильності вибору архітектури залежить надійність системи, її масштабованість, енергоефективність, зручність обслуговування та можливість подальшого розширення.

З урахуванням призначення розроблюваної системи вона повинна забезпечувати збір даних з датчиків, первинну обробку виміряних значень, передавання інформації між функціональними блоками, відображення параметрів на користувацькому інтерфейсі та кольорову індикацію окремих станів середовища. У межах даної роботи кольорова індикація використовується для наочного відображення рівня концентрації CO_2 та наявності грозової активності. Формування текстових або звукових попереджень у даній реалізації не передбачається.

Для побудови систем контролю параметрів навколишнього середовища можуть використовуватися різні типи архітектур, зокрема централізована, децентралізована, клієнт-серверна та розподілена архітектура на основі бездротової сенсорної мережі. Кожна з них має свої переваги та обмеження, тому вибір конкретного підходу повинен виконуватися з урахуванням

структури системи, кількості точок вимірювання, вимог до автономності та способу відображення даних.

Насамперед розглянемо централізовану архітектуру.

Централізована архітектура спрощує розробку програмного забезпечення, зменшує кількість складних взаємозв’язків між модулями та полегшує обслуговування системи [22].

Класична централізована архітектура, у якій усі датчики безпосередньо підключаються до одного контролера дротовими лініями [23].

Таким чином, централізована архітектура може бути адаптована для систем, у яких частина датчиків розміщується окремо від головного пристрою. У цьому випадку центральний блок зберігає функції обробки, аналізу та відображення даних, а віддалений вузол виконує лише вимірювання та передавання інформації. Такий підхід дозволяє поєднати простоту централізованої структури з гнучкістю бездротового розміщення окремих сенсорних модулів. На рисунку 2.1 показано просту діаграму роботи централізованої архітектури [22].



Рисунок 2.1 – Проста діаграма роботи централізованої архітектури

Наступним етапом проаналізуємо децентралізовану архітектуру.

Децентралізована архітектура передбачає відсутність єдиного головного вузла керування. У такій системі окремі вузли можуть самостійно збирати, обробляти дані та приймати рішення. Перевагою цього підходу є підвищення стійкості системи до відмов, оскільки вихід з ладу одного вузла не обов’язково призводить до припинення роботи всієї системи. Така архітектура є доцільною для складних систем, у яких необхідно контролювати велику кількість незалежних зон або виконувати локальне керування на кожній ділянці [22].

Разом з тим децентралізована архітектура є складнішою у реалізації. Вона потребує організації взаємодії між вузлами, синхронізації даних, контролю стану кожного модуля та складнішого програмного забезпечення [24]. Крім того, у такій структурі кожен вузол повинен мати достатні обчислювальні ресурси для виконання власних функцій обробки або прийняття рішень. Це може збільшувати вартість системи, ускладнювати її налаштування та обслуговування. На рисунку 2.2 показано просту діаграму роботи децентралізованої архітектури [22].

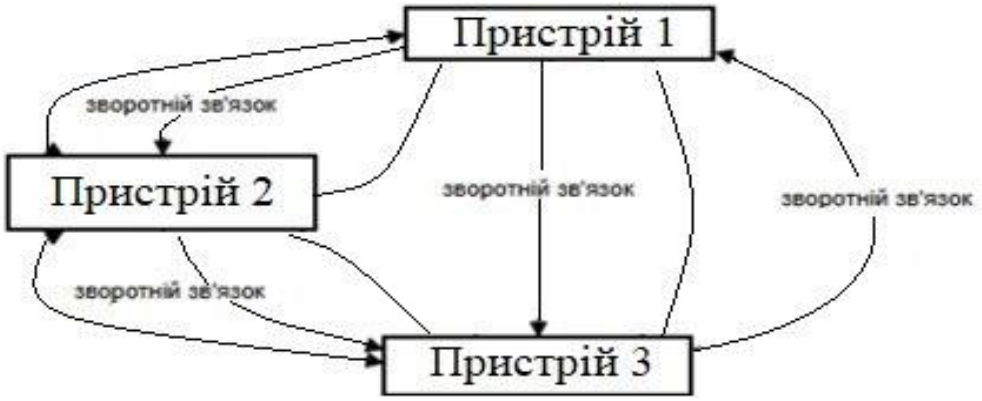


Рисунок 2.2 – Проста діаграма роботи децентралізованої архітектури

Далі висвітлимо клієнт-серверну архітектуру.

Клієнт-серверна архітектура використовується у системах, де сенсорні вузли або мікроконтролери передають дані на сервер, а користувач отримує доступ до них через веб-інтерфейс, мобільний застосунок або хмарну платформу. Такий підхід є зручним для віддаленого контролю, централізованого збереження історії вимірювань, побудови графіків, формування статистики та інтеграції з іншими сервісами [22].

Клієнт-серверна архітектура є доцільною для систем, у яких необхідно накопичувати великі обсяги даних, виконувати аналітичну обробку, забезпечувати доступ кількох користувачів або здійснювати контроль параметрів з різних місць. Проте така архітектура потребує наявності сервера, стабільного мережевого підключення та додаткового програмного забезпечення

для обробки й збереження даних. У разі відсутності зв’язку з сервером частина функцій системи може бути недоступною, що знижує автономність локального пристрою. На рисунку 2.3 показано просту діаграму роботи клієнт-серверної архітектури [22].



Рисунок 2.3 – Проста діаграма роботи клієнт-серверної архітектури

Окремо доцільно розглянути розподілену архітектуру на основі бездротової сенсорної мережі.

Розподілена архітектура передбачає використання значної кількості сенсорних вузлів, які розміщуються у різних точках об’єкта та можуть взаємодіяти між собою або передавати дані до шлюзу. Такий підхід є ефективним для великих виробничих приміщень, складських комплексів або промислових територій, де необхідно здійснювати контроль багатьох зон одночасно. Його перевагами є масштабованість, можливість гнучкого розміщення датчиків та охоплення великої площі контролю [24].

Водночас розподілена сенсорна мережа має вищу складність порівняно з централізованою архітектурою. Для її реалізації необхідно забезпечити надійний обмін даними між вузлами, контроль стану кожного сенсорного модуля, енергоефективну роботу автономних пристроїв та захист від втрати пакетів даних. Крім того, у великих мережах може виникати потреба в маршрутизації повідомлень, використанні шлюзів або спеціалізованих протоколів зв’язку.

У таблиці 2.2 наведено порівняння розглянутих архітектур.

Таблиця 2.2 – Порівняння архітектур системи контролю параметрів навколишнього середовища

Тип архітектури	Переваги	Недоліки	Доцільність для розроблюваної системи
1	2	3	4
Централізована з віддаленим вузлом збору даних	Проста логіка роботи, централізована обробка та відображення даних, зручне обслуговування, можливість бездротового підключення зовнішнього вузла	Залежність системи від центрального блока	Найбільш доцільна, оскільки внутрішній блок виконує роль центрального пристрою, а зовнішній блок передає до нього виміряні дані
Децентралізована	Окремі вузли можуть працювати самостійно, підвищується гнучкість і стійкість до відмов	Складніша синхронізація, більша складність програмної реалізації, вища вартість окремих вузлів	Надлишкова для даної системи, оскільки зовнішній блок не виконує самостійного керування
Клієнт-серверна	Віддалений доступ, збереження історії вимірювань, можливість аналітики та інтеграції з іншими сервісами	Потребує сервера, мережі або хмарної платформи, залежить від стабільності підключення	Може бути напрямом подальшого розвитку

Продовження таблиці 2.2

1	2	3	4
Розподілена локальна	Масштабованість, можливість контролю багатьох зон, гнучке розміщення вузлів	Складніша мережева взаємодія, потреба в контролі зв’язку та живлення багатьох вузлів	Недоцільна для поточної реалізації, оскільки система має один центральний блок і один віддалений сенсорний вузол

Після аналізу наведених архітектур встановлено, що для розроблюваної системи найбільш доцільною є централізована архітектура з віддаленим вузлом збору даних. Такий підхід відповідає фактичній структурі системи, у якій внутрішній блок виконує роль центрального пристрою обробки та відображення інформації, а зовнішній блок використовується як автономний сенсорний вузол для збору додаткових параметрів середовища.

У такій структурі внутрішній блок приймає дані від власних датчиків, отримує інформацію від зовнішнього блока, виконує обробку виміряних значень та забезпечує їх виведення на дисплей. Зовнішній блок при цьому не є самостійним центром керування системою, а виконує функцію віддаленого вимірювального модуля. Він здійснює збір даних про параметри зовнішнього середовища, формує пакет даних і передає його до внутрішнього блока через бездротовий канал зв’язку.

Обрана архітектура дозволяє поєднати простоту централізованої обробки з перевагами бездротового передавання даних від віддаленого сенсорного вузла. Це зменшує потребу у прокладанні додаткових дротових ліній, забезпечує зручне розміщення датчиків та спрощує користування системою. Крім того, така структура залишає можливість подальшого розширення системи шляхом додавання нових датчиків або додаткових вузлів збору даних.

Отже, у межах даної роботи обрано централізовану архітектуру з віддаленим вузлом збору даних. Вона найкраще відповідає поставленим вимогам, оскільки забезпечує локальну обробку та відображення інформації, автономність роботи основних функцій системи, бездротове передавання даних від зовнішнього блока та простоту подальшого обслуговування.

Перед проєктуванням структури автоматизованої системи доцільно розглянути особливості виробничого приміщення, у якому вона буде застосовуватися. Це дозволить врахувати розміщення обладнання, джерела можливого впливу на параметри середовища та обґрунтувати подальше розташування елементів системи контролю.

Об’єктом проєктування є виробниче приміщення, призначене для розміщення обладнання фотополімерного 3D-друку. У приміщенні передбачається встановлення 3D-принтерів Elegoo Saturn 4 Ultra 16K [25], які використовуються для виготовлення деталей методом полімеризації рідкої фотополімерної смоли під дією УФ-випромінювання. Такий тип обладнання потребує стабільних умов експлуатації, оскільки від стану робочого середовища залежить якість друку, безпечність роботи персоналу та збереження властивостей витратних матеріалів.

Виробниче приміщення має площу 12 квадратних метрів та умовні габарити 4 м × 3 м. Додатково передбачено санвузол площею 1,68 квадратних метрів з габаритами 1,4 м × 1,2 м. Загальна планувальна структура об’єкта включає основну виробничу зону, столи з 3D-принтерами, місце для внутрішнього блока системи контролю, шафу для зберігання допоміжних матеріалів, вікна, дверні прорізи, санвузол та зовнішній блок, розміщений поза межами виробничого приміщення. Окрім цього, на плані передбачено схематичне розміщення елементів припливно-витяжної вентиляції, зокрема витяжної магістралі, вентиляційних дифузорів та зони подачі свіжого повітря.

План виробничого приміщення та санвузла зображений на рисунку 2.4.

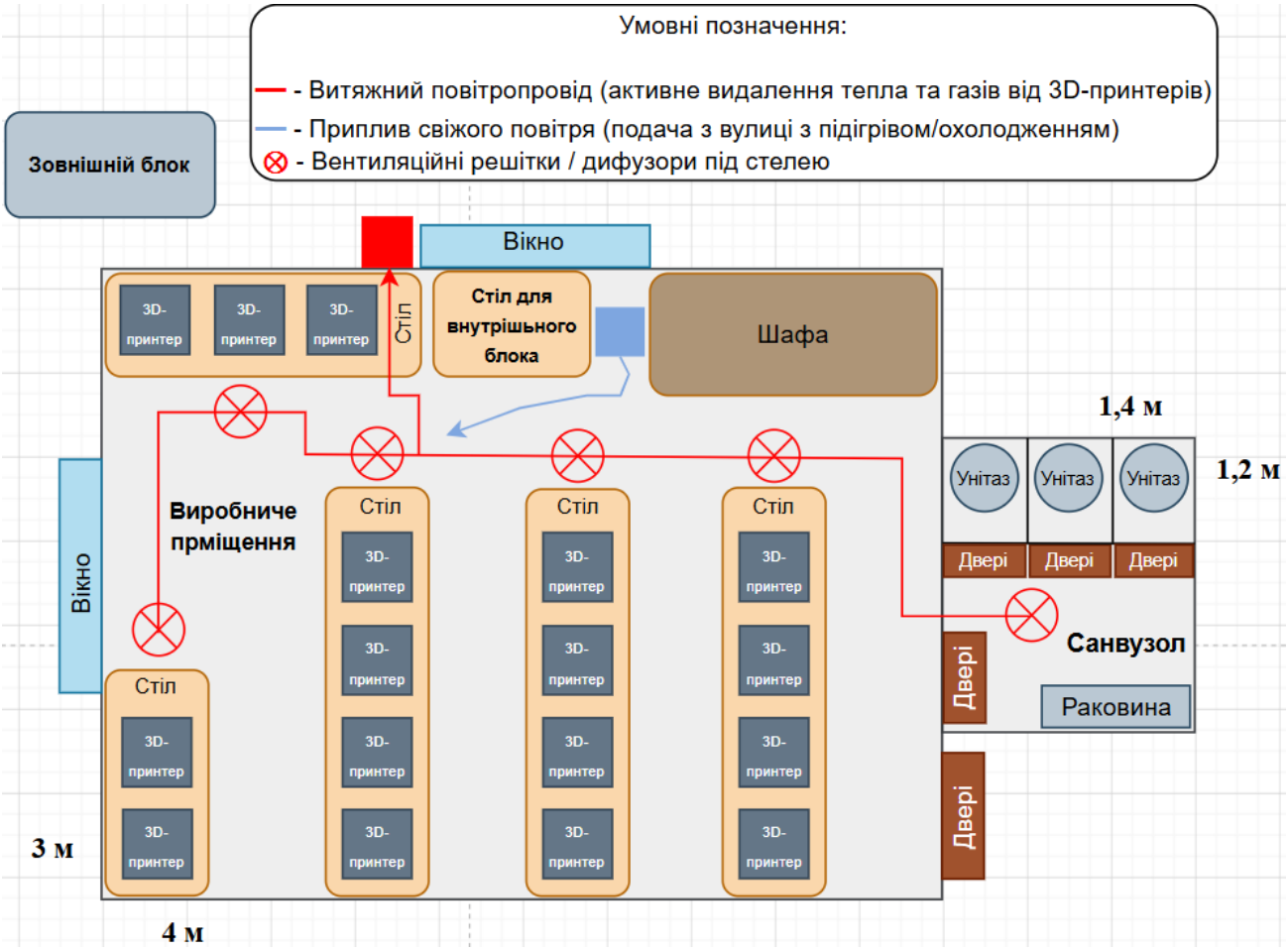


Рисунок 2.4 – План виробничого приміщення та санвузла

У виробничій зоні передбачається розміщення декількох робочих столів, на яких встановлюються 3D-принтери. Відповідно до плану приміщення, обладнання розташоване вздовж стін та у центральній частині приміщення. Таке компонування дозволяє раціонально використати доступну площу, забезпечити доступ до кожного принтера для обслуговування, заміни витратних матеріалів, зняття готових виробів та проведення контролю стану обладнання.

Водночас значна кількість 3D-принтерів на обмеженій площі створює додаткові вимоги до контролю параметрів середовища. Одночасна робота декількох пристроїв може призводити до локального підвищення температури, нерівномірний розподіл тепла в робочій зоні, накопичення випаровувань фотополімерної смоли, а також погіршення якості повітря. Тому під час проєктування системи необхідно враховувати особливості розміщення обладнання, наявність вікон, дверей та організацію повітрообміну.

У приміщенні передбачено віконні прорізи, які можуть використовуватися для природного провітрювання. Також поза межами виробничого приміщення розміщується зовнішній блок системи контролю. Його доцільно застосовувати для вимірювання параметрів зовнішнього середовища, зокрема температури та вологості повітря. Порівняння показників зовнішнього і внутрішнього блоків дозволяє оцінювати вплив зовнішніх умов на мікроклімат приміщення, визначати доцільність провітрювання та аналізувати ефективність повітрообміну.

Оскільки у виробничому приміщенні наявні вікна, необхідно враховувати можливий вплив прямого сонячного випромінювання на технологічний процес фотополімерного 3D-друку. Прямі сонячні промені можуть спричиняти нагрів робочих поверхонь, підвищення температури поблизу обладнання та небажаний вплив на фотополімерну смолу, яка є чутливою до УФ-випромінювання. З метою мінімізації такого впливу на вікнах доцільно передбачити встановлення жалюзі або світлозахисних штор. Це дозволить обмежити потрапляння прямого сонячного світла на столи з 3D-принтерами, забезпечити більш стабільний температурний режим у робочій зоні та підвищити достовірність вимірювання параметрів навколишнього середовища. Це сприятиме підтриманню стабільніших умов у робочій зоні.

Внутрішній блок системи контролю параметрів навколишнього середовища розміщується на окремому столі, як показано на плані. Таке розташування забезпечує зручний доступ користувача до інтерфейсу відображення даних та дозволяє здійснювати контроль показників безпосередньо у виробничій зоні. Усі сенсори, призначені для оцінювання стану повітря всередині приміщення, входять до складу внутрішнього блока, тому система не передбачає окремого розміщення датчиків у різних точках виробничої зони. Таке рішення спрощує конструкцію системи, зменшує кількість з’єднань і полегшує її експлуатацію.

З урахуванням специфіки фотополімерного 3D-друку у виробничому приміщенні передбачено організацію припливно-витяжної вентиляції.

Необхідність такого рішення обумовлена тим, що під час роботи 3D-принтерів є виділення характерного запаху та можливих випаровувань, тому система контролю повинна своєчасно виявляти погіршення якості повітря. Як непрямий індикатор якості повітря та ефективності вентиляції використовується концентрація CO_2 – підвищення її рівня свідчить про недостатній повітрообмін, що є сигналом для активізації вентиляції або провітрювання. Контроль летких органічних сполук (VOC), характерних для випаровувань фотополімерної смоли, може бути реалізований шляхом додавання відповідного датчика як напрям подальшого розвитку системи. Для забезпечення безпечних і стабільних умов праці вентиляція повинна забезпечувати видалення забрудненого повітря з робочої зони та подачу свіжого повітря ззовні.

На плані приміщення червоним кольором позначено витяжний повітропровід, призначений для активного видалення теплого та забрудненого повітря від зон розміщення 3D-принтерів. Витяжна магістраль прокладена під стелею таким чином, щоб охоплювати основні ділянки розміщення обладнання. Уздовж повітропроводу розташовано витяжні дифузори, через які здійснюється забір повітря з приміщення. Таке розташування дозволяє відводити повітря з ділянок, де найбільш імовірне накопичення тепла та випаровувань.

Синім кольором на плані позначено приплив свіжого повітря. Припливна частина системи розташована у верхній частині приміщення, поблизу шафи та столу для внутрішнього блока. Такий варіант розміщення забезпечує подачу свіжого повітря з боку, протилежного основним витяжним точкам, що сприяє формуванню спрямованого руху повітряного потоку через виробничу зону. У результаті свіже повітря надходить у приміщення, проходить через робочий простір і далі відводиться через витяжні елементи.

Важливим елементом системи є правильне балансування витяжки. Усі витяжні дифузори (анемостати) повинні бути обладнані регульованими клапанами для балансування витрати повітря. Це дозволяє змінювати інтенсивність забору повітря в окремих точках системи, зменшувати витрату повітря на ближчих ділянках і забезпечувати достатню тягу у віддаленіших

зонах. Завдяки цьому досягається більш рівномірний розподіл повітряних потоків по всьому приміщенню та підвищується ефективність видалення забрудненого повітря.

Запропонована схема вентиляції забезпечує рух повітря від зони припливу до зон витяжки, що є доцільним для приміщення з фотополімерними 3D-принтерами. Така організація повітрообміну дозволяє зменшити накопичення тепла, покращити якість повітря у робочій зоні, знизити вплив шкідливих випаровувань на персонал та створити стабільніші умови для роботи обладнання.

Таким чином, виробниче приміщення для фотополімерного 3D-друку є об’єктом з підвищеними вимогами до контролю параметрів навколишнього середовища. Висока щільність розміщення 3D-принтерів, використання фотополімерних смол, потреба у стабільному температурно-вологісному режимі, захист робочої зони від прямого сонячного випромінювання, організація ефективної вентиляції та необхідність забезпечення безпечних умов праці обґрунтовують доцільність впровадження автоматизованої системи контролю. Розроблена система повинна забезпечувати вимірювання параметрів середовища за допомогою внутрішнього та зовнішнього блоків, обробку отриманих даних, їх відображення для користувача та формування попереджень у разі виходу показників за встановлені межі.

2.3 Розробка структурної схеми системи контролю параметрів навколишнього середовища у виробничих приміщеннях

Структурна схема системи контролю параметрів навколишнього середовища у виробничих приміщеннях побудована за розподіленою архітектурою та складається з двох основних частин: внутрішнього та зовнішнього блока. Такий підхід дозволяє окремо контролювати параметри середовища всередині виробничого приміщення та отримувати додаткові дані про зовнішні умови.

Насамперед розглянемо структуру внутрішнього блока.

Внутрішній блок є основною частиною системи. Він розміщується безпосередньо у виробничому приміщенні та виконує функції збору, обробки, приймання і відображення інформації. До його складу входять датчики, мікроконтролер, радіомодуль та екран.

Датчики внутрішнього блока призначені для вимірювання параметрів навколишнього середовища всередині приміщення. Вони можуть контролювати температуру, вологість, атмосферний тиск та концентрацію вуглекислого газу та рівень освітленості приміщення. Дані з датчиків передаються до мікроконтролера за допомогою відповідних інтерфейсів зв’язку.

Мікроконтролер внутрішнього блока є центральним елементом цієї частини системи. Він виконує опитування підключених датчиків, приймає виміряні значення, проводить їх первинну обробку та формує інформацію для відображення на екрані. Крім того, мікроконтролер приймає дані від зовнішнього блока через радіомодуль, об’єднує їх з локальними вимірюваннями та забезпечує подальшу роботу всієї системи.

Радіомодуль внутрішнього блока призначений для бездротового приймання даних від зовнішнього блока. Він забезпечує зв’язок між двома частинами системи без необхідності прокладання дротових ліній між ними. Це спрощує монтаж системи та дозволяє розміщувати зовнішній модуль у зручному місці.

Екран використовується для виведення результатів вимірювання у зручному для користувача вигляді. На ньому можуть відображатися поточні значення температури, вологості, тиску, концентрації CO_2, поточного рівня яскравості дисплея, а також дані, отримані від зовнішнього блока. Завдяки цьому користувач може швидко оцінити стан навколишнього середовища без використання додаткових пристроїв.

Наступним етапом зосередимо увагу на структурі зовнішнього блока.

Зовнішній блок є додатковим сенсорним модулем системи. Він розміщується за межами приміщення та призначений для вимірювання

зовнішніх параметрів навколишнього середовища. До його складу входять датчики, мікроконтролер та радіомодуль.

Датчики зовнішнього блока виконують вимірювання зовнішніх параметрів середовища, таких як температура, вологість повітря, УФ-індекс (розраховується на основі виміряної інтенсивності УФ-випромінювання), а також фіксацію грозової активності, зокрема виявлення блискавок та орієнтовне визначення відстані до грозового фронту. Отримані значення передаються до мікроконтролера для подальшої обробки.

Мікроконтролер зовнішнього блока керує роботою зовнішнього сенсорного модуля. Він зчитує дані з датчиків, виконує їх первинну обробку, формує пакет даних і передає його до радіомодуля. Також мікроконтролер може відповідати за періодичність вимірювань, що дозволяє зменшити енергоспоживання зовнішнього блока.

Радіомодуль зовнішнього блока забезпечує бездротову передачу виміряних даних до внутрішнього блока. Завдяки цьому зовнішній блок може працювати автономно та не потребує фізичного з’єднання з основною частиною системи. Передача даних виконується у вигляді інформаційних пакетів, які приймаються радіомодулем внутрішнього блока.

Далі розглянемо взаємодію основних вузлів системи.

З функціональної точки зору система включає вимірювальні, обчислювальні, комунікаційні та відображальні вузли, а також автономний вузол живлення зовнішнього блока.

У внутрішньому блоці вимірювальні елементи кожні 5 секунд зчитують параметри навколишнього середовища та передають отримані значення до центрального керуючого вузла, де виконується їх первинна обробка, оновлення поточних показників та підготовка інформації для виведення на екран.

Зовнішній блок працює як автономний сенсорний модуль. Його вимірювальні елементи кожну хвилину отримують дані про зовнішні умови, після чого керуючий вузол формує інформаційний пакет і передає його через

бездротовий канал зв’язку до внутрішнього блока. Після приймання цей пакет обробляється та об’єднується з даними внутрішніх вимірювань.

Окремо у зовнішньому блоці передбачено автономне живлення. Енергія надходить від сонячного джерела до вузла заряджання акумулятора, після чого через елементи захисту та стабілізації подається на електронні компоненти блока. Додатковий вимірювальний вузол контролює напругу та струм живлення, що дає змогу оцінювати стан автономного джерела енергії.

Після обробки всіх отриманих даних внутрішній блок відображає узагальнену інформацію про стан навколишнього середовища всередині приміщення та зовнішні умови. Така структура забезпечує розділення функцій між блоками, зручне розміщення сенсорів і централізоване відображення результатів вимірювань.

На рисунку 2.5 показано розроблену структурну схему системи контролю параметрів навколишнього середовища у виробничих приміщеннях із зовнішнім сенсорним модулем.

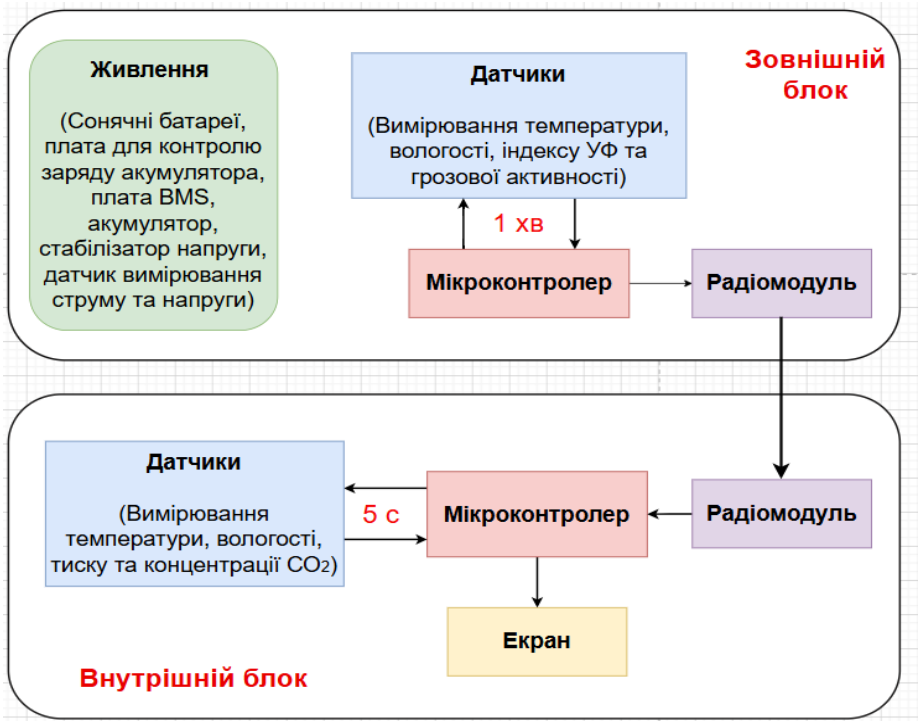


Рисунок 2.5 – Розроблена структурна схема системи контролю параметрів навколишнього середовища у виробничих приміщеннях із зовнішнім сенсорним модулем

Таким чином, запропонована структурна схема забезпечує локальний контроль параметрів навколишнього середовища у виробничому приміщенні, а також приймання зовнішніх даних від окремого зовнішнього модуля. Використання двох функціональних блоків підвищує гнучкість розробленого рішення, спрощує його монтаж і дозволяє розширювати функціональність шляхом додавання нових датчиків або модулів у майбутньому.

2.4 Розробка алгоритмів роботи системи контролю параметрів навколишнього середовища у виробничих приміщеннях

Для опису послідовності роботи розроблюваної системи було складено декілька алгоритмів функціонування, які охоплюють роботу внутрішнього та зовнішнього блоків.

Насамперед розглянемо алгоритм роботи зовнішнього блока системи контролю параметрів навколишнього середовища у виробничих приміщеннях, який показано на рисунку 2.6.

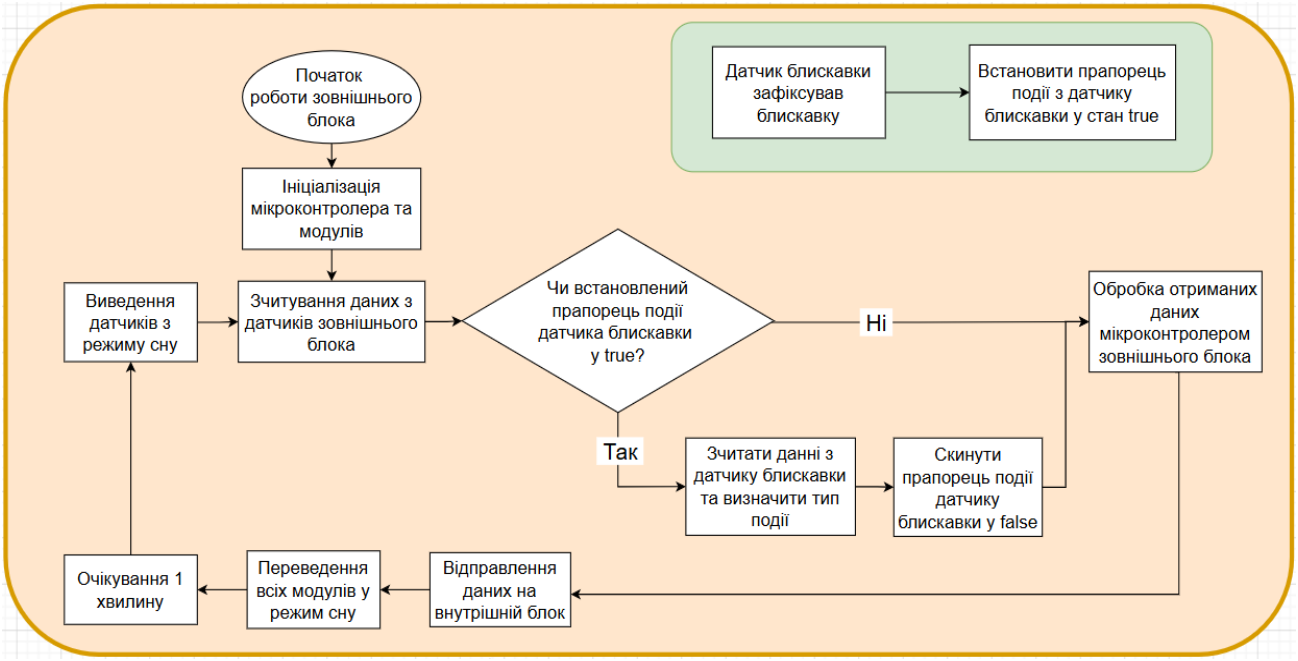


Рисунок 2.6 – Розроблений алгоритм роботи зовнішнього блока

Основне призначення блока полягає у періодичному збиранні даних про параметри навколишнього середовища, фіксації подій блискавки, передаванні інформації до внутрішнього блока та зменшенні енергоспоживання під час очікування. Робота алгоритму починається з ініціалізації мікроконтролера та підключених модулів. Після цього зовнішній блок зчитує дані з датчиків температури, вологості, УФ-випромінювання, напруги акумулятора та інших вимірювальних елементів, передбачених у системі. Окремо в алгоритмі враховано роботу датчика блискавки – у разі фіксації відповідної події встановлюється спеціальний програмний прапорець. Після основного зчитування даних мікроконтролер перевіряє стан цього прапорця. Якщо подія блискавки не була зафіксована – система переходить до обробки отриманих вимірювальних даних, якщо прапорець події встановлений – мікроконтролер додатково зчитує інформацію з датчика блискавки та визначає тип зафіксованої події. Якщо подія класифікується датчиком AS3935 як блискавична активність, додатково зчитуються орієнтовна відстань до грозового фронту та інтенсивність зафіксованого розряду, які визначаються вбудованими алгоритмами мікросхеми. Отримані значення додаються до пакета даних, що передається до внутрішнього блока. Після цього прапорець скидається, щоб та сама подія не оброблялася повторно під час наступного циклу роботи. Після обробки даних зовнішній блок формує повідомлення та передає його до внутрішнього блока. Далі всі модулі переводяться в режим сну, що дозволяє зменшити споживання енергії автономного блока. Після очікування протягом однієї хвилини датчики виводяться з режиму сну і цикл роботи повторюється.

Далі розглянемо алгоритм роботи внутрішнього блока системи контролю параметрів навколишнього середовища у виробничих приміщеннях, який показано на рисунку 2.7.

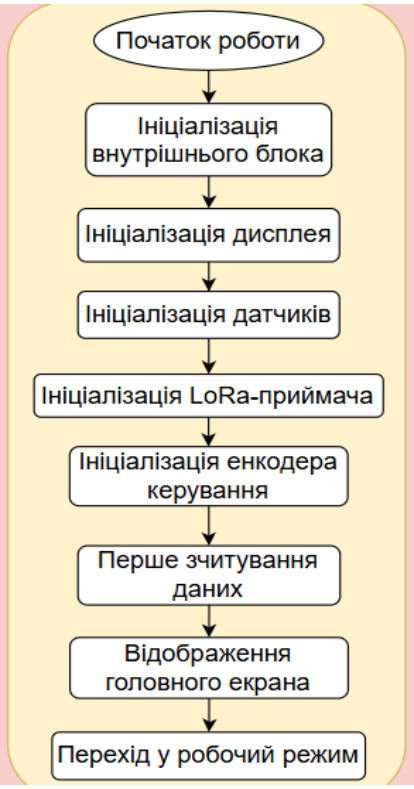


Рисунок 2.7 – Розроблений алгоритм ініціалізації внутрішнього блока

Основною задачею цього алгоритму є підготовка всіх апаратних і програмних компонентів до подальшої роботи та забезпечення коректного переходу системи у робочий режим. Робота алгоритму починається із запуску внутрішнього блока. Після цього виконується ініціалізація мікроконтролера, під час якої налаштовуються основні параметри роботи системи, інтерфейси обміну даними та внутрішні ресурси пристрою. Наступним етапом є ініціалізація дисплея. На цьому етапі виконується налаштування параметрів відображення графічного інтерфейсу, підготовка екрана до виведення інформації та перевірка його працездатності. Після цього здійснюється ініціалізація датчиків, які використовуються для вимірювання параметрів навколишнього середовища всередині приміщення. Далі налаштовується приймач бездротового зв’язку, через який внутрішній блок отримує інформацію від зовнішнього блока. Окремо виконується ініціалізація енкодера керування, який використовується для навігації по інтерфейсу користувача та взаємодії з функціями системи. Після завершення налаштування всіх компонентів здійснюється перше зчитування даних із модулів системи.

Отримані значення використовуються для формування початкового стану інтерфейсу користувача. Наступним етапом є відображення головного екрана, на якому виводяться основні параметри та службова інформація із зовнішнього блока (рівень заряду акумулятора, рівень сигналу та силу струму). До отримання першого пакета від зовнішнього блока ці показники відображаються у вигляді прочерків. Після цього внутрішній блок переходить у робочий режим, у якому система починає безперервний контроль параметрів та взаємодію з користувачем.

Далі зосередимо увагу на розробленому алгоритмі роботи основного циклу внутрішнього блока системи контролю параметрів навколишнього середовища у виробничих приміщеннях, який представлено на рисунку 2.8.

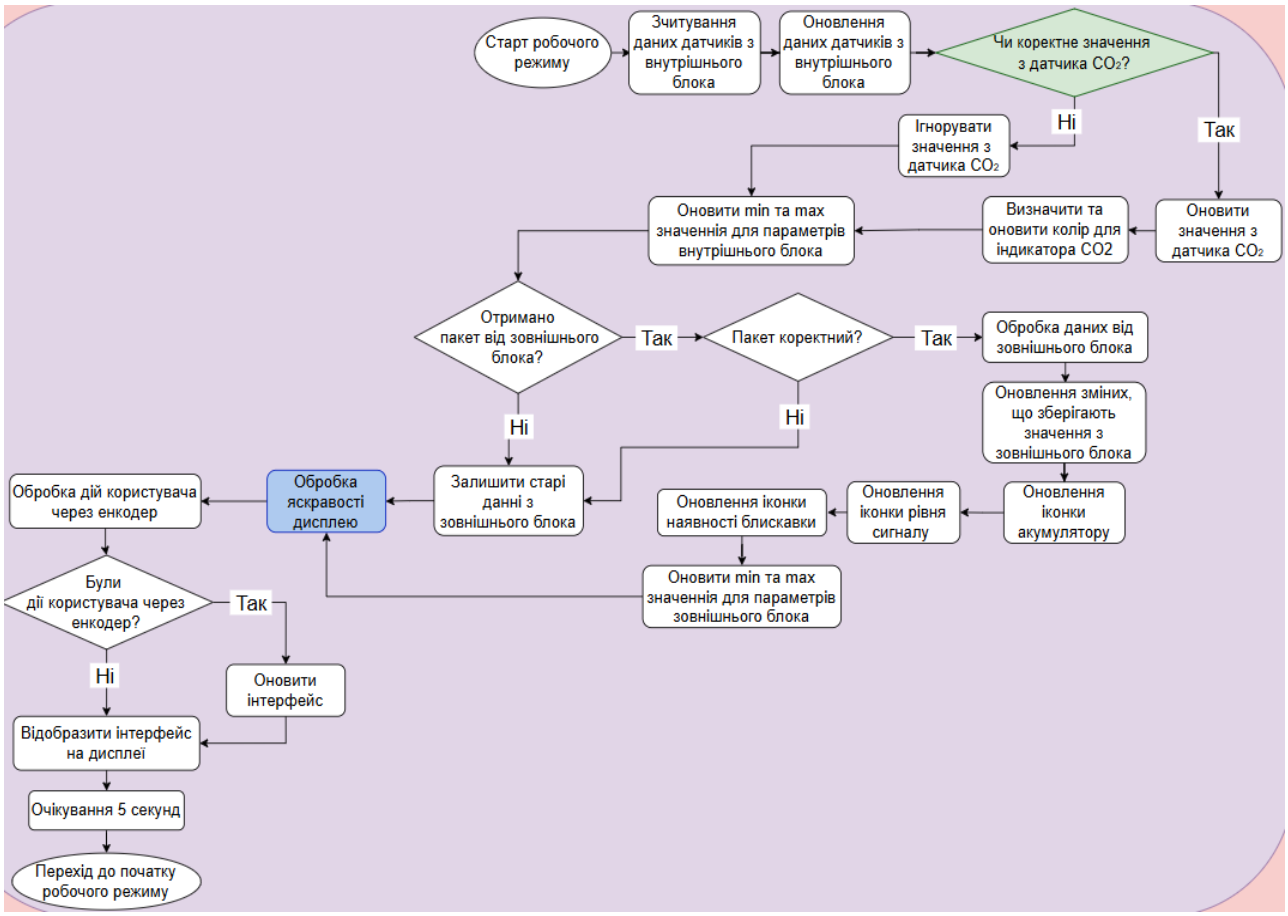


Рисунок 2.8 – Розроблений алгоритм роботи основного циклу ВБ

Алгоритм забезпечує періодичне зчитування даних із датчиків, приймання інформації від зовнішнього блока, обробку отриманих значень,

оновлення інтерфейсу користувача та взаємодію через енкодер керування. Після переходу у робочий режим система виконує зчитування даних внутрішніх датчиків та оновлює їх значення. Окремо перевіряється коректність даних, отриманих із датчика концентрації вуглекислого газу. Якщо значення є коректним – система оновлює показники концентрації газу та визначає колір індикатора відповідно до рівня якості повітря. Якщо отримане значення є помилковим або некоректним – воно ігнорується. Після оновлення показників внутрішнього блока система визначає мінімальні та максимальні значення параметрів, що дозволяє зберігати статистику вимірювань. Наступним етапом є перевірка наявності пакета даних від зовнішнього блока. Якщо пакет не отримано, то система продовжує використовувати останні збережені значення, якщо пакет отримано – додатково перевіряється його коректність. У разі успішної перевірки виконується обробка даних зовнішнього блока та оновлення змінних, що містять актуальні вимірювання. Після обробки даних система оновлює службові елементи інтерфейсу, зокрема індикатор заряду акумулятора, рівня сигналу бездротового зв’язку та наявності подій блискавки. Також оновлюються мінімальні та максимальні значення параметрів зовнішнього блока. Окремий етап алгоритму відповідає за автоматичне регулювання яскравості дисплея відповідно до рівня освітлення навколишнього середовища – це забезпечує комфортне відображення інформації та зменшує енергоспоживання дисплея. Далі система обробляє дії користувача, отримані через енкодер керування. Якщо користувач виконав певну дію – інтерфейс оновлюється відповідно до вибраного режиму або екрана. Після цього інформація відображається на дисплеї. Після завершення всіх етапів система переходить у режим очікування на п’ять секунд, після чого цикл роботи повторюється знову. Такий підхід забезпечує постійне оновлення даних та стабільну роботу всієї автоматизованої системи.

Далі доцільно окремо розглянути розроблений алгоритм перевірки коректності значень, отриманих із датчика концентрації вуглекислого газу, для

відсіювання некоректних значень під час прогрівання датчика, який представлено на рисунку 2.9.

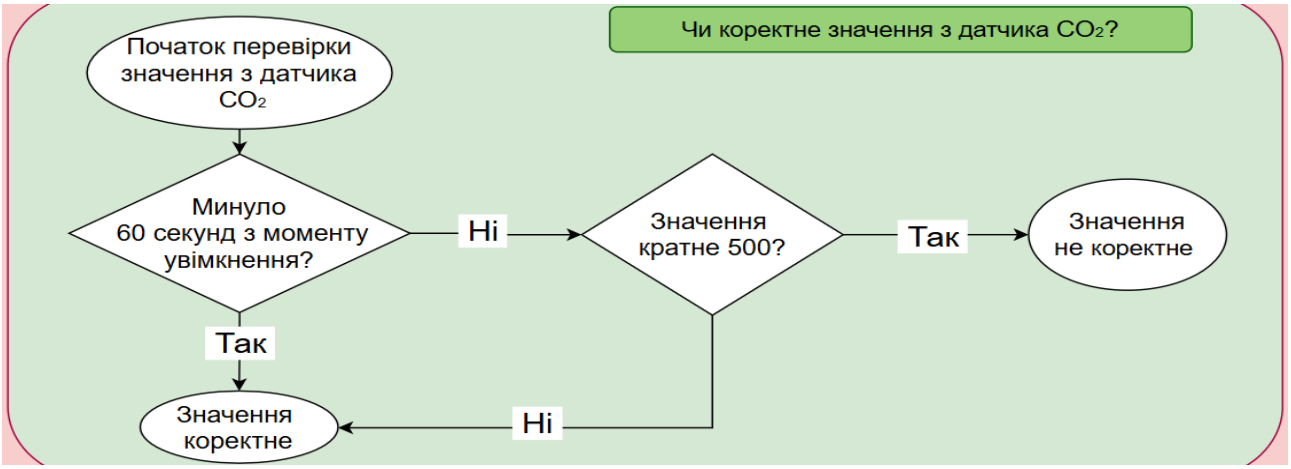


Рисунок 2.9 – Розроблений алгоритм перевірки коректності значень датчика концентрації вуглекислого газу під час прогрівання

Основною задачею алгоритму є виявлення помилкових показників для запобігання відображенню некоректної інформації користувачу. Робота алгоритму починається з отримання нового значення концентрації вуглекислого газу. Насамперед система перевіряє час, який минув з моменту увімкнення датчика, оскільки після запуску йому необхідний певний час для стабілізації та виходу на коректний режим вимірювання. Якщо з моменту запуску минуло більше 60 секунд – значення вважається коректним і може використовуватися системою для подальшої обробки та відображення. Якщо час стабілізації ще не завершився – система додатково перевіряє, чи є отримане значення кратним 500. Такі показники можуть свідчити про нестабільну роботу датчика під час прогріву або про некоректне вимірювання. Якщо значення кратне 500 – воно позначається як помилкове, в іншому випадку значення є коректним і використовується в подальшій роботі системи. Застосування такого алгоритму дозволяє підвищити достовірність вимірювань та зменшити ймовірність відображення помилкових даних під час запуску системи або нестабільної роботи датчика.

Розроблений алгоритм обробки яскравості дисплею показано на рис. 2.10.

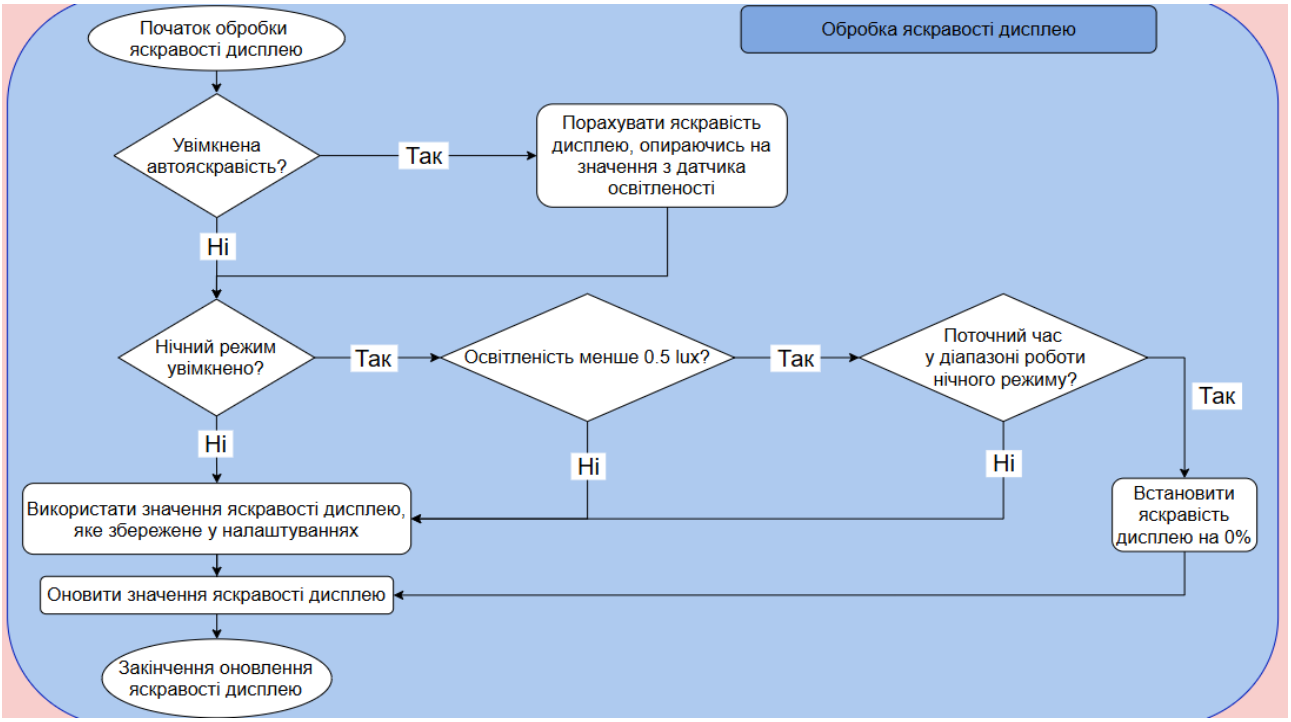


Рисунок 2.10 – Розроблений алгоритм обробки яскравості дисплею

Основною задачею алгоритму є автоматичне або ручне керування рівнем яскравості дисплея залежно від умов освітлення та налаштувань користувача. Робота алгоритму починається з перевірки стану автоматичного регулювання яскравості. Якщо функція автояскравості увімкнена – система обчислює необхідний рівень яскравості дисплея на основі значень, отриманих із датчика освітленості. Якщо автоматичне регулювання вимкнене – система переходить до перевірки нічного режиму. У випадку, коли нічний режим не активний – використовується значення яскравості, попередньо встановлене користувачем у налаштуваннях системи. Якщо нічний режим увімкнений – система додатково аналізує рівень освітленості навколишнього середовища. Якщо освітленість менша за 0,5 lux – виконується перевірка поточного часу, якщо час знаходиться в межах встановленого діапазону НР – яскравість дисплея встановлюється на рівень 0 %, що дозволяє повністю вимкнути підсвічування дисплея в нічний період. Якщо хоча б одна з умов нічного режиму не виконується, система використовує значення яскравості, збережене у налаштуваннях користувача. Після визначення необхідного рівня яскравості система оновлює параметри дисплея та застосовує нове значення підсвічування. Після завершення

оновлення алгоритм завершує роботу та очікує наступного циклу виконання. Застосування такого алгоритму дозволяє підвищити комфорт використання системи в різних умовах освітлення, зменшити енергоспоживання дисплея та уникнути надмірної яскравості в нічний час.

2.5 Вибір технічних засобів

Під час вибору технічних засобів для розроблюваної системи враховувалися функціональні вимоги, умови експлуатації, кількість вимірюваних параметрів, енергоспоживання, доступність компонентів, простота підключення та можливість подальшого розширення системи. Оскільки система складається з внутрішнього та зовнішнього блоків, вибір елементів доцільно виконувати окремо для кожного з них.

Насамперед здійснимо вибір технічних засобів внутрішнього блока.

Першим кроком буде вибір мікроконтролера.

Мікроконтролер внутрішнього блока є центральним елементом системи, оскільки саме він виконує зчитування даних з датчиків, приймання інформації від зовнішнього блока, обробку отриманих значень та виведення результатів на дисплей. У внутрішньому блоці до мікроконтролера планується підключення радіомодуля, дисплея, датчиків температури, вологості, тиску, CO_2 та освітленості. Тому під час вибору мікроконтролера необхідно враховувати не лише його продуктивність, а й кількість доступних інтерфейсів.

У таблиці 2.3 наведено вимоги до мікроконтролера внутрішнього блока.

Таблиця 2.3 – Вимоги до мікроконтролера внутрішнього блока

Вимога	Обґрунтування
1	2
Підтримка SPI	Потрібна для підключення дисплея та радіомодуля
Підтримка I^2C	Потрібна для підключення датчиків температури, вологості, тиску та освітленості

Продовження таблиці 2.3

1	2
Підтримка UART	Потрібна для підключення датчика CO_2
Достатня продуктивність	Необхідна для обробки даних з декількох датчиків, приймання інформації від зовнішнього блока та оновлення графічного дисплея
Достатній обсяг оперативної пам’яті	Потрібний для стабільної роботи з дисплеєм, буферами даних і декількома модулями одночасно
Робота з сучасними модулями	Більшість сучасних сенсорів і радіомодулів зручно використовувати з логічними рівнями 3,3 В
Можливість подальшого розширення	Дає змогу додати інші датчики або модулі у майбутньому
Простота програмування	Важлива для практичної реалізації системи

Для вибору мікроконтролера внутрішнього блока буде розглянуто характеристики трьох варіантів: ESP32, Arduino Nano та Raspberry Pi Pico.

На рисунку 2.11 показано зовнішній вигляд мікроконтролерної плати ESP32 [26].

На рисунку 2.12 показано зовнішній вигляд мікроконтролерної плати Arduino Nano [27].

На рисунку 2.13 показано зовнішній вигляд мікроконтролера Raspberry Pi Pico [28].

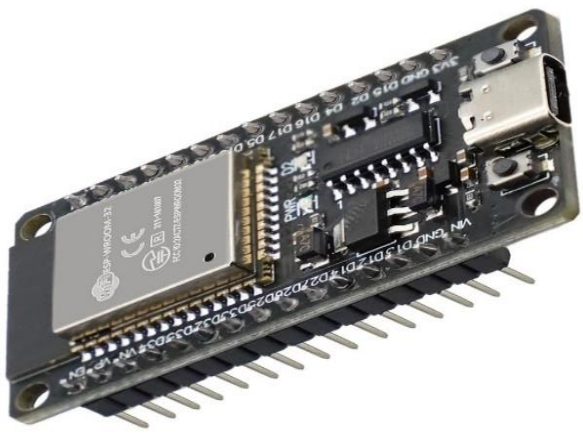


Рисунок 2.11 – Зовнішній вигляд мікроконтролерної плати ESP32

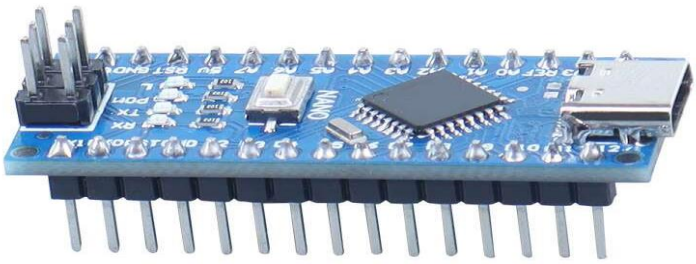


Рисунок 2.12 – Зовнішній вигляд мікроконтролерної плати Arduino Nano

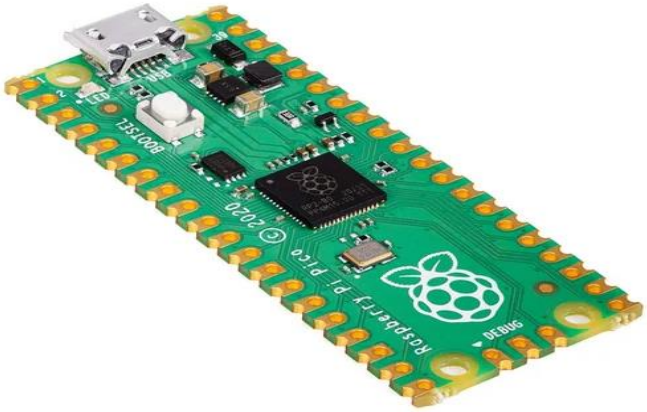


Рисунок 2.13 – Зовнішній вигляд мікроконтролера Raspberry Pi Pico

У таблиці 2.4 наведено порівняння характеристик можливих варіантів мікроконтролерів внутрішнього блока.

Таблиця 2.4 – Порівняння характеристик можливих варіантів мікроконтролерів внутрішнього блока

Характеристика	ESP32	Arduino Nano	Raspberry Pi Pico
1	2	3	4
Робоча напруга	5 В [26]	5 В [27]	3,3 В [31]
Підтримка SPI	4 x SPI [26]	1 × SPI [30]	2 x SPI [28]
Підтримка I^2C	2 x I^2C [26]	1 × I^2C [30]	2 x I^2C [28]
Підтримка UART	3 x UART [26]	1 × UART [30]	2 x UART [28]
Основний процесор	Xtensa LX6 (двоядерний) або одноядерний [29]	ATmega328P (AVR) [29]	RP2040 (двоядерний ARM Cortex-M0+) [29]
Тактова частота	160 або 240 МГц [29]	16 МГц [29]	133 МГц [29]

Продовження таблиці 2.4

1	2	3	4
Флеш-пам'ять	4 МБ [29]	32 КБ [29]	2 МБ [29]
SRAM	520 КБ [29]	2 КБ [29]	264 КБ [29]
Піни GPIO	36+ [29]	22 [29]	26+ [29]
Аналоговий вхід	12-х 12-бітний SAR АЦП [29]	8х 10-бітний АЦП [29]	3х 12-бітний АЦП [29]
Аналоговий вихід	2х 8-бітний ЦАП [29]	0 ЦАП (лише ШІМ) [29]	0 ЦАП (лише ШІМ) [29]
Wi-Fi / Bluetooth	Так (Wi-Fi та BT/BLE) [29]	Ні [29]	Ні [29]
Програмування	Arduino IDE, ESP-IDF, MicroPython [29]	Arduino IDE (C++) [29]	MicroPython, C/C++ [29]
Приблизна ціна	від 6 $ до 10 $ [29]	від 10 $ до 20 $ [29]	4 $ [29]
Розміри	18 мм × 25,5 мм × 3,10 мм [26]	18 мм х 43 мм [27]	53 мм х 21 мм [31]

За результатами порівняння, наведеного у таблиці, для внутрішнього блока системи контролю параметрів навколишнього середовища доцільно обрати мікроконтролер ESP32. Так як внутрішній блок є основним вузлом системи, він повинен приймати дані з локальних датчиків, отримувати інформацію від зовнішнього модуля через радіомодуль, виконувати первинну обробку виміряних значень та виводити результати на екран. У структурі розроблюваної системи мікроконтролер внутрішнього блока виконує саме функції збору, обробки, приймання та відображення інформації, тому до нього висуваються підвищені вимоги щодо продуктивності та кількості інтерфейсів підключення.

Порівняно з Arduino Nano, ESP32 має значно вищу продуктивність, більший обсяг оперативної пам’яті та ширші можливості для підключення периферійних пристроїв. Це важливо, оскільки до внутрішнього блока

планується підключення радіомодуля, дисплея, датчиків температури, вологості, тиску, CO_2 та освітленості. Для мікроконтролера, який буде обрано, важливими є підтримка SPI, I^2C, UART, достатній обсяг оперативної пам’яті, сумісність із сучасними модулями та можливість подальшого розширення системи. Raspberry Pi Pico також є достатньо продуктивним мікроконтролером, однак у цьому випадку ESP32 має перевагу завдяки наявності вбудованих бездротових інтерфейсів Wi-Fi та Bluetooth. Навіть якщо у поточній реалізації основний зв’язок між внутрішнім і зовнішнім блоком здійснюється через радіомодуль, наявність Wi-Fi та Bluetooth створює резерв для подальшого розвитку системи, наприклад для передавання даних на інші пристрої, підключення до локальної мережі або реалізації додаткових функцій контролю. Перевагою ESP32 також є наявність декількох апаратних інтерфейсів, що дозволяє одночасно працювати з різними модулями системи.

Отже, ESP32 є найбільш доцільним вибором для внутрішнього блока розроблюваної системи, оскільки він поєднує достатню обчислювальну продуктивність, великий набір інтерфейсів, підтримку сучасних цифрових модулів, можливість роботи з дисплеєм та потенціал для подальшого розширення системи. На відміну від Arduino Nano, він не має суттєвих обмежень за пам’яттю та продуктивністю для роботи з кількома датчиками й графічним інтерфейсом. Порівняно з Raspberry Pi Pico, ESP32 є більш універсальним саме для IoT-подібного внутрішнього блока завдяки вбудованим засобам бездротового зв’язку. Тому використання ESP32 дозволяє реалізувати функціональний, гнучкий і масштабований внутрішній блок системи контролю параметрів навколишнього середовища.

Другим кроком буде вибір датчика температури, вологості та атмосферного тиску для внутрішнього блока.

У таблиці 2.5 наведено вимоги до такого датчика.

Таблиця 2.5 – Вимоги до датчика температури, відносної вологості та атмосферного тиску

Вимога	Обґрунтування
Вимірювання температури	Є одним з основних параметрів мікроклімату
Вимірювання вологості	Вологість впливає на комфорт і умови праці
Вимірювання атмосферного тиску	Дозволяє розширити функціональність системи
Цифровий інтерфейс	Спрощує підключення до мікроконтролера та зменшує похибки передавання сигналу
Низьке енергоспоживання	Зменшує загальне навантаження на систему
Компактність	Спрощує розміщення датчика в корпусі ВБ

Для вибору датчику, який вимірюватиме основні параметри мікроклімату приміщення, буде розглянуто характеристики трьох варіантів: BME280, BMP280 та SHT31.

На рисунку 2.14 показано зовнішній вигляд датчика BME280 [32].

На рисунку 2.15 показано зовнішній вигляд датчика BMP280 [34].

На рисунку 2.16 показано зовнішній вигляд датчика SHT31 [35].



Рисунок 2.14 – Зовнішній вигляд датчика BME280

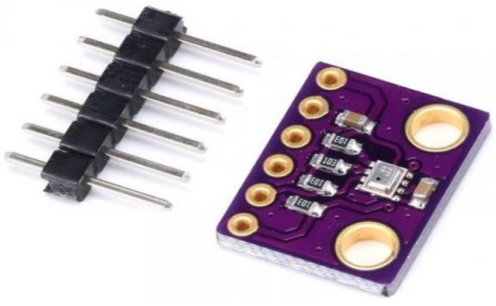


Рисунок 2.15 – Зовнішній вигляд датчика BMP280

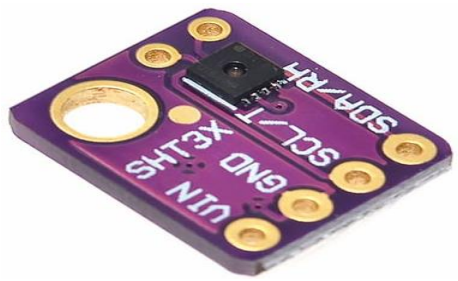


Рисунок 2.16 – Зовнішній вигляд датчика SHT31

У таблиці 2.6 наведено порівняння характеристик можливих варіантів датчиків.

Таблиця 2.6 – Порівняння характеристик можливих варіантів датчиків

Характеристика	BME280	BMP280	SHT31
1	2	3	4
Вимірювані параметри	Температура, вологість, атмосферний тиск	Температура, атмосферний тиск	Температура, вологість
Напруга живлення	Від 1,8 В до 5 В постійного струму [32]	Від 1,71 В до 3,6 В [34]	Від 2,15 В до 5,5 В [35]
Інтерфейс	I^2C (до 3,4 МГц), SPI (до 10 МГц) [32]	I^2C (максимальна частота 3,4 МГц), SPI (максимальна частота 10 МГц) [34]	I^2C (до 1 МГц) [35]
Діапазон робочої температури	Від -40 °С до +85 °С [32]	Від -40 °С до +85 °С [34]	Від -40 °С до +125 °С [35]
Діапазон робочої вологості	Від 0 % до 100 % [32]	-	Від 0 % до 100 % [35]
Діапазон робочого тиску	Від 300 гПа до 1100 гПа [32]	Від 300 гПа до 1100 гПа [34]	-
Точність температури	Від 0,5 °С до 1 °С [33]	Приблизно 1 °С [34]	Приблизно 0,3 °С [35]

Продовження таблиці 2.6

1	2	3	4
Точність вологості	3 % [33]	-	Приблизно 2 % [35]
Точність тиску	1 гПа [33]	Приблизно 0,12 гПа [34]	-
Розмір модуля	15 мм х 12 мм х 3 мм [33]	15 мм х 12 мм [34]	12 мм х 10 мм [35]
Споживаний струм	350 мкА [33]	2,7 мкА при частоті опитування 1 Гц [34]	Від 2 мкА до 5 мкА [35]

Після порівняння можливих варіантів датчиків доцільно обрати BME280, оскільки він найкраще відповідає вимогам внутрішнього блока системи контролю параметрів навколишнього середовища. Основною перевагою BME280 є те, що цей датчик є багатофункціональним і дозволяє вимірювати одразу три важливі параметри: температуру, відносну вологість та атмосферний тиск. У порівнянні з BMP280, який вимірює лише температуру та тиск, BME280 додатково забезпечує вимірювання вологості. У порівнянні з SHT31, який вимірює температуру та вологість, BME280 додатково має можливість вимірювання атмосферного тиску. Тобто один модуль BME280 замінює одразу кілька окремих датчиків, що спрощує конструкцію пристрою, зменшує кількість підключень і робить систему компактнішою.

Також важливо, що BME280 підтримує два поширені інтерфейси обміну даними – I²C та SPI. Це робить його зручним для підключення до мікроконтролера ESP32, оскільки в розроблюваній системі вже використовуються цифрові інтерфейси для взаємодії з іншими модулями. Наявність I²C дозволяє підключити датчик до спільної шини разом з іншими сенсорами, а SPI може використовуватись у випадках, коли потрібна вища швидкість обміну даними. За діапазонами вимірювання BME280 також повністю підходить для поставленої задачі. Він працює в температурному

діапазоні від -40 °C до +85 °C, вимірює вологість у межах від 0 % до 100 %, а також атмосферний тиск у діапазоні від 300 гПа до 1100 гПа. Цих характеристик достатньо для контролю мікроклімату у виробничих приміщеннях, де важливо відстежувати зміну температури, вологості та тиску для оцінювання стану навколишнього середовища. Окремою перевагою BME280 є його низьке енергоспоживання. Згідно з порівняльною таблицею, споживаний струм датчика становить близько 350 мкА, що є прийнятним для компактної вбудованої системи. Крім того, датчик має невеликі габарити, тому його легко розмістити всередині внутрішнього блока без значного збільшення розміру пристрою. BME280 також є зручним у практичній реалізації, оскільки він має широку підтримку серед мікроконтролерних платформ, зокрема ESP32. Для нього доступні готові бібліотеки, приклади підключення та документація, що спрощує програмну реалізацію зчитування даних. Датчик калібрується на заводі, тому не потребує складного налаштування перед використанням і забезпечує стабільну роботу протягом тривалого часу [17].

Третім кроком буде вибір датчика концентрації вуглекислого газу (CO_2).

У таблиці 2.7 наведено вимоги до датчика CO_2.

Таблиця 2.7 – Вимоги до датчика CO_2

Вимога	Обґрунтування
Стабільність показників	Важлива для тривалого контролю стану повітря
Вимірювання концентрації CO_2 у приміщенні	Дозволяє оцінити якість повітря та ефективність вентиляції
Достатній діапазон вимірювання	Показник CO_2 у приміщенні може змінюватися залежно від кількості людей і роботи вентиляції
Сумісність з мікроконтролером	Датчик має підключатися до ESP32 через доступний інтерфейс
Простота використання	Спрощує практичну реалізацію системи

Для вибору датчика CO_2 буде розглянуто характеристики трьох варіантів: MH-Z19B, MH-Z19C та MH-Z19D.

На рисунку 2.17 показано зовнішній вигляд датчика MH-Z19B [36].

На рисунку 2.18 показано зовнішній вигляд датчика MH-Z19C [37].

На рисунку 2.19 показано зовнішній вигляд датчика MH-Z19D [38].



Рисунок 2.17 – Зовнішній вигляд датчика MH-Z19B

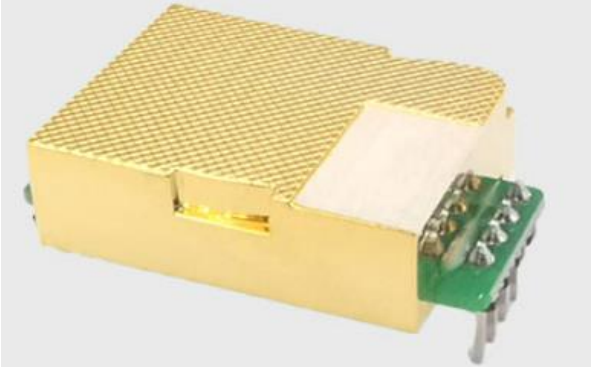


Рисунок 2.18 – Зовнішній вигляд датчика MH-Z19C

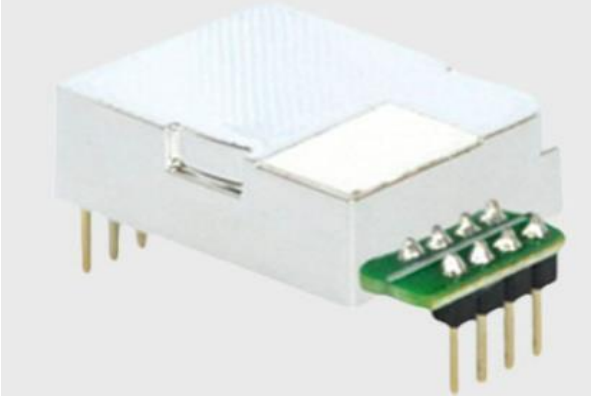


Рисунок 2.19 – Зовнішній вигляд датчика MH-Z19D

У таблиці 2.8 наведено порівняння характеристик можливих варіантів датчиків концентрації вуглекислого повітря.

Таблиця 2.8 – Порівняння характеристик можливих варіантів датчиків концентрації вуглекислого повітря

Характеристика	MH-Z19B	MH-Z19C	MH-Z19D
1	2	3	4
Принцип вимірювання	NDIR [36]	NDIR [37]	NDIR [38]
Робоча напруга живлення	Від 4,5 В до 5,5 В постійного струму [36]	5 В постійного струму (допустиме відхилення 0,1 В) [37]	5 В постійного струму (допустиме відхилення 0,1 В) [38]
Середній струм	Менше 60 мА (живлення при 5 В) [36]	Менше 40 мА (живлення при 5 В) [37]	Менше 40 мА (живлення при 5 В) [38]
Піковий струм	150 мА (при 5 В) [36]	125 мА (при 5 В) [37]	125 мА (при 5 В) [38]
Рівень інтерфейсу	3,3 В (сумісний з 5 В) [36]	3,3 В (сумісний з 5 В) [37]	3,3 В (сумісний з 5 В) [38]
Діапазон вимірювання	Від 400 ppm до 5000 ppm [36]	Від 400 ppm до 5000 ppm [39]	Від 400 ppm до 10000 ppm [38]
Вихідний сигнал	UART (рівень інтерфейсу TTL 3,3 В) [36]	UART (рівень інтерфейсу TTL 3,3 В) [37]	UART (рівень інтерфейсу TTL 3,3 В) [38]
Час попереднього розігріву	3 хв [36]	2,5 хв [39]	1 хв [38]
Робоча вологість	Від 0 % до 90 % відносної вологості (без конденсації) [36]	Від 0 % до 95 % відносної вологості (без конденсації) [37]	Від 0 % до 95 % відносної вологості (без конденсації) [38]
Робоча температура	Від 0 °C до +50 °C [36]	Від -10 °C до +50 °C [37]	Від 0 °C до +50 °C [38]
Час відгуку	T90 < 120 с [36]	T90 < 120 с [37]	T90 < 120 с [38]

Продовження таблиці 2.8

1	2	3	4
Температура зберігання	Від -20 ℃ до +60 ℃ [36]	Від -20 ℃ до +60 ℃ [37]	Від -20 ℃ до +60 ℃ [38]
Розмір	33 мм × 20 мм × 9 мм [36]	32,9 мм × 19,7 мм × 8,6 мм [37]	32,9 мм × 19,7 мм × 8,6 мм [38]
Маса	5 г [36]	5 г [37]	5 г [38]
Термін служби	Більше 5 років [36]	Більше 10 років [37]	Більше 5 років [38]

За результатами порівняння було встановлено, що датчики серії MH-Z19 мають подібний принцип роботи та призначені для вимірювання концентрації вуглекислого газу CO_2 у повітрі. Усі розглянуті моделі підтримують цифровий інтерфейс UART та ШІМ-вихід, що дозволяє інтегрувати їх у мікроконтролерну систему контролю параметрів навколишнього середовища.

Для розроблюваної системи найбільш доцільним є використання датчика MH-Z19D. Порівняно з MH-Z19B він має менше середнє та пікове споживання струму, а також коротший час попереднього розігріву. Порівняно з MH-Z19C модель MH-Z19D має ширший діапазон вимірювання концентрації CO_2, що дає змогу використовувати датчик не лише для контролю нормального стану повітря, а й для фіксації значного перевищення концентрації CO_2 у приміщенні.

Четвертим кроком буде вибір датчика освітленості.

Датчик освітленості у внутрішньому блоці потрібен для вимірювання рівня освітлення в приміщенні та можливого автоматичного регулювання яскравості дисплея. У таблиці 2.9 наведено вимоги до датчика освітленості.

Таблиця 2.9 – Вимоги до датчика освітленості

Вимога	Обґрунтування
1	2
Цифровий інтерфейс	Спрощує підключення та обробку даних

Продовження таблиці 2.9

1	2
Стабільність показників	Важлива для коректного регулювання яскравості дисплея
Робота з напругою 3,3 В	Забезпечує сумісність з ESP32
Компактність	Спрощує розміщення в корпусі

Для вибору датчика освітленості буде розглянуто характеристики трьох варіантів: VEML7700, TSL2561 та GY-302 BH1750FVI.

На рисунку 2.20 показано зовнішній вигляд датчика VEML7700 [40].

На рисунку 2.21 показано зовнішній вигляд датчика TSL2561 [41].

На рисунку 2.22 показано зовнішній вигляд датчика GY-302 BH1750FVI [42].

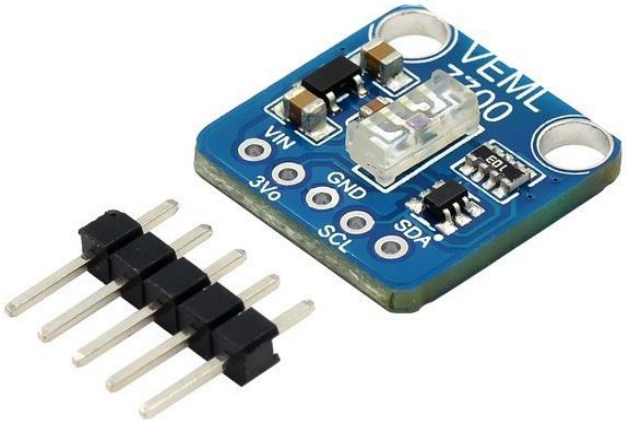


Рисунок 2.20 – Зовнішній вигляд датчика VEML7700



Рисунок 2.21 – Зовнішній вигляд датчика TSL2561

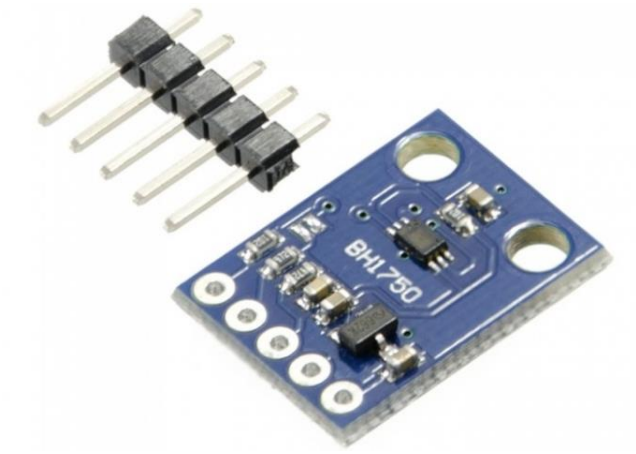


Рисунок 2.22 – Зовнішній вигляд датчика GY-302 BH1750FVI

У таблиці 2.10 наведено порівняння характеристик можливих варіантів датчиків освітленості.

Таблиця 2.10 – Порівняння характеристик можливих варіантів датчиків освітленості

Характеристика	VEML7700	TSL2561	GY-302 BH1750FVI
Тип виходу	Цифровий [40]	Цифровий [41]	Цифровий [42]
Інтерфейс	I²C [40]	I²C [41]	I²C [42]
Напруга живлення	Від 3,3 В до 5 В [40]	Від 3 В до 5 В [41]	Від 3 В до 5 В [42]
Струм споживання	45 мкА [40]	0,6 мА [41]	7 мА [42]
Діапазон вимірювання	Від 0 лк до 140000 лк [40]	Від 0,1 лк до 40000 лк [41]	Від 0 лк до 65535 лк [42]
Розміри	16,5 мм × 16,5 мм [40]	17 мм x 13 мм [41]	13,9 мм x 18,5 мм [42]
Робоча температура	Від -25 °C до +85 °C [40]	Від -30 °C до +70 °C [41]	Від -40 °C до +85 °C [42]
Температура зберігання	Від -25 °C до +85 °C [40]	Від -40 °C до +85 °C [41]	Від -40 °C до +100 °C [42]

За результатами порівняння датчиків освітленості VEML7700, TSL2561 та GY-302 BH1750FVI встановлено, що всі розглянуті варіанти мають цифровий тип виходу та використовують інтерфейс I²C, тому можуть бути підключені до мікроконтролера ESP32 без складних додаткових схем. Водночас датчик VEML7700 має найширший діапазон вимірювання освітленості – від 0 лк до 140000 лк, а також найменший струм споживання серед розглянутих варіантів, що робить його енергоефективним і придатним для тривалої роботи в системі.

Порівняно з TSL2561 та GY-302 BH1750FVI, датчик VEML7700 краще підходить для внутрішнього блока системи, оскільки забезпечує вимірювання як низьких, так і високих рівнів освітленості. Це дає змогу використовувати його не лише для контролю освітлення у приміщенні, а й для автоматичного регулювання яскравості дисплея залежно від умов навколишнього освітлення. Тому для реалізації внутрішнього блока обрано датчик освітленості VEML7700.

П’ятим кроком буде вибір дисплея.

Дисплей повинен забезпечувати зручне відображення великої кількості параметрів.

У таблиці 2.11 наведено вимоги до дисплею.

Таблиця 2.11 – Вимоги до дисплею

Вимога	Обґрунтування
1	2
Достатній розмір екрана	Дисплей має відображати декілька параметрів одночасно: температуру, вологість, тиск, CO_2, зовнішні показники, стан зв’язку та акумулятора
Достатня роздільна здатність	Вища роздільна здатність дає змогу розмістити більше інформації на екрані без перевантаження інтерфейсу
Підтримка кольорового зображення	Колір дозволяє візуально виділяти нормальні, попереджувальні та критичні значення параметрів

Продовження таблиці 2.11

1	2
Сумісність з ESP32	Дисплей повинен працювати з логічними рівнями 3,3 В або мати сумісність з ними
Підтримка поширеного інтерфейсу підключення	Використання SPI або I^2C спрощує підключення до ESP32 та програмну реалізацію
Можливість роботи з бібліотеками для ESP32	Для спрощення розробки інтерфейсу дисплей має підтримуватися популярними бібліотеками

Для вибору дисплею буде розглянуто характеристики трьох варіантів: 4,0″ SPI TFT LCD ILI9488, 3,2″ TFT LCD ILI9325 та OLED 0,96″ I2C SSD1306.

На рисунку 2.23 показано зовнішній вигляд дисплею 4,0″ SPI TFT LCD ILI9488 [43].

На рисунку 2.24 показано зовнішній вигляд дисплею 3,2″ TFT LCD ILI9325 [44].

На рисунку 2.25 показано зовнішній вигляд дисплею OLED 0,96″ I2C SSD1306 [45].



Рисунок 2.23 – Зовнішній вигляд дисплею 4,0″ SPI TFT LCD ILI9488



Рисунок 2.24 – Зовнішній вигляд дисплею 3,2″ TFT LCD ILI9325

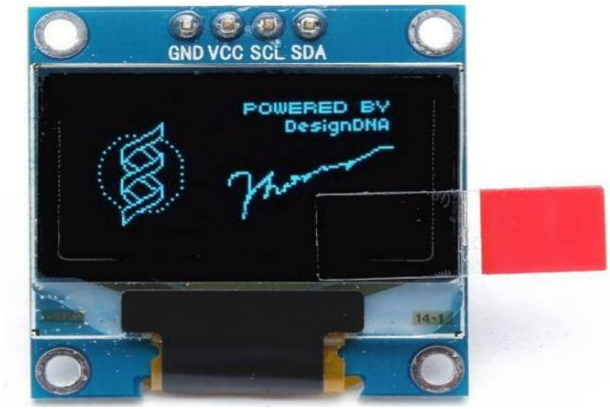


Рисунок 2.25 – Зовнішній вигляд дисплею OLED 0,96″ I2C SSD1306

У таблиці 2.12 наведено порівняння характеристик можливих варіантів дисплеїв.

Таблиця 2.12 – Порівняння характеристик можливих варіантів дисплеїв

Характеристика	4,0″ SPI TFT LCD ILI9488	3,2″ TFT LCD ILI9325	OLED 0,96″ I2C SSD1306
1	2	3	4
Тип дисплея	TFT [43]	TFT [44]	OLED [45]
Діагональ	4,0″ [43]	3,2″ [44]	0,96″ [45]
Роздільна здатність	480 × 320 [43]	320 × 240 [44]	128 × 64 [45]
Драйвер дисплея	ILI9488 [43]	ILI9325 [44]	SSD1306 [45]

Продовження таблиці 2.12

1	2	3	4
Кольоровість	65536 [43]	65536 [44]	Монохромний [45]
Основний інтерфейс підключення	SPI 3-wire/4-wire, MCU i8080 8bit/16bit [43]	16-bit паралельний інтерфейс [44]	I^2C, SPI [45]
Напруга живлення	3,3 В [43]	5 В [44]	Від 3,3 В до 6 В [45]
Логічні рівні сигналів	3,3 В [43]	3,3 В [44]	3,3 В або 5 В [45]
Можливість виведення графічного інтерфейсу	Висока	Висока	Обмежена через малий розмір і монохромність
Зручність для відображення багатьох параметрів	Висока	Середня	Низька
Розмір модуля	108,04 мм × 61,74 мм [43]	95 мм × 62 мм [44]	27 мм × 28 мм × 4 мм [45]

За результатами порівняння для внутрішнього блока доцільно обрати 4,0″ SPI TFT LCD дисплей з драйвером ILI9488. Він має найбільшу діагональ серед розглянутих варіантів, високу роздільну здатність 480×320 пікселів, підтримує кольорове відображення та дозволяє створити повноцінний графічний інтерфейс користувача. Це важливо, оскільки внутрішній блок повинен одночасно відображати значну кількість параметрів: температуру, вологість, атмосферний тиск, концентрацію CO_2, рівень освітленості, зовнішні показники, стан радіозв’язку та напругу акумулятора зовнішнього блока.

Порівняно з 3,2″ TFT LCD ILI9325, обраний чотиридюймовий дисплей має більшу площу екрана та вищу роздільну здатність, що робить його зручнішим для побудови інформативного інтерфейсу. Крім того, використання SPI-інтерфейсу дозволяє зменшити кількість задіяних виводів мікроконтролера порівняно з 16-бітним паралельним інтерфейсом. OLED-дисплей 0,96″ SSD1306 є компактним і простим у підключенні, однак через малу діагональ, низьку роздільну здатність і монохромне зображення він не підходить як основний дисплей внутрішнього блока.

Далі перейдемо до вибору технічних засобів зовнішнього блока та першим кроком виберемо мікроконтролер.

Мікроконтролер зовнішнього модуля повинен періодично зчитувати дані з датчиків, контролювати напругу акумулятора та передавати інформацію до внутрішнього блока через радіомодуль. Оскільки зовнішній блок працює автономно, основною вимогою є низьке енергоспоживання.

У таблиці 2.13 наведено вимоги до мікроконтролера зовнішнього блока.

Таблиця 2.13 – Вимоги до мікроконтролера зовнішнього блока

Вимога	Обґрунтування
Низьке енергоспоживання	Зовнішній блок працює від акумулятора
Робота з напругою 3,3 В	Забезпечує сумісність з датчиками і LoRa-модулем
Підтримка I^2C	Потрібна для датчика температури, вологості та блискавки
Підтримка SPI	Потрібна для радіомодуля
Наявність ADC	Потрібна для вимірювання напруги акумулятора і сигналу, який видає датчик УФ-випромінювання на своєму виході
Простота програмування	Спрощує практичну реалізацію системи
Компактність	Важлива для розміщення у корпусі ЗБ
Простота програмування	Спрощує практичну реалізацію системи

Для вибору мікроконтролера зовнішнього блока буде розглянуто характеристики трьох варіантів: Arduino Pro Mini 3,3 V, Arduino Uno та STM32F103C8T6.

На рисунку 2.26 показано зовнішній вигляд мікроконтролера Arduino Pro Mini 3,3 V [46].

На рисунку 2.27 показано зовнішній вигляд мікроконтролера Arduino Uno R3 [47].

На рисунку 2.28 показано зовнішній вигляд мікроконтролера STM32F103C8T6 [47].



Рисунок 2.26 – Зовнішній вигляд мікроконтролера Arduino Pro Mini 3,3 V



Рисунок 2.27 – Зовнішній вигляд мікроконтролера Arduino Uno R3



Рисунок 2.28 – Зовнішній вигляд мікроконтролера STM32F103C8T6

У таблиці 2.14 наведено порівняння характеристик можливих варіантів мікроконтролерів для зовнішнього блока.

Таблиця 2.14 – Порівняння характеристик можливих варіантів мікроконтролерів для зовнішнього блока

Характеристика	Arduino Pro Mini 3,3 V	Arduino Uno R3	STM32F103C8T6
1	2	3	4
Мікроконтролер	AVR 8-біт (ATmega328P) [46]	AVR 8-біт (ATmega328P) [47]	ARM Cortex-M3, 32-біт [47]
Тактова частота	8 МГц [46]	16 МГц [47]	до 72 МГц [47]
Оперативна пам’ять (SRAM)	2 КБ [46]	2 КБ [47]	20 КБ [47]
Флеш-пам’ять	32 КБ [46]	32 КБ [47]	64 КБ [47]
Аналогові входи (ADC)	8 (10-бітні) [46]	6 [47]	до 10 (12-біт) [47]
PWM-виходи	6 [46]	6 [47]	до 12 [47]
UART / SPI / I^2C	1 / 1 / 1 [46]	1 / 1 / 1 [47]	3 / 2 / 2 [47]

Продовження таблиці 2.14

1	2	3	4
Напруга живлення	3,3 В [46]	5 В [47]	3,3 В (з підтримкою 5 В через резистори) [47]
Енергоспоживання (робочий режим)	Приблизно 1,7 мА	Від 15 мА до 20 мА [47]	Приблизно 2,5 мА [47]
Температурний діапазон	Від -40 °C до +85 °C [46]	Від 0 °C до +70 °C [47]	Від -40 °C до +85 °C [47]
Розмір	34 мм x 19 мм x 4 мм [46]	68 мм x 53 мм x 15 мм	54 мм x 23,2 мм x 11,5 мм
Простота освоєння	Дуже проста (підтримується Arduino IDE та має просту логіку програмування)	Проста (одна з найпоширеніших плат для початкового навчання)	Середня (потребує кращого розуміння налаштування периферії та середовища розробки)
Доступність навчальних матеріалів	Дуже висока (багато прикладів для датчиків, LoRa-модулів та автономних пристроїв)	Висока (велика кількість навчальних матеріалів і готових прикладів)	Середня (технічна документація та приклади є, але вони складніші для початкового освоєння)

За результатами порівняння Arduino Pro Mini 3,3 V є доцільним вибором для зовнішнього блока системи, оскільки поєднує компактні розміри, низьке енергоспоживання та роботу від напруги 3,3 В. Такі характеристики важливі для автономного пристрою, який працює від акумулятора та має розміщуватися у невеликому корпусі. Плата має достатні ресурси для виконання поставлених завдань: 32 КБ флеш-пам’яті, 2 КБ SRAM, 8 аналогових входів, 6 PWM-

виходів, а також інтерфейси UART, SPI та I²C. Це дозволяє підключити необхідні датчики й модуль бездротової передачі даних без використання надлишково потужного мікроконтролера.

Отже, Arduino Pro Mini 3,3 V обрана через оптимальне співвідношення функціональності, енергоефективності, простоти програмування та габаритів. Порівняно з Arduino Uno R3 вона компактніша й краще підходить для автономного живлення, а порівняно зі STM32F103C8T6 – простіша в освоєнні та достатня для задач зовнішнього модуля.

Другим кроком буде вибір датчика температури та вологості зовнішнього повітря.

У таблиці 2.15 наведено вимоги до такого датчика.

Таблиця 2.15 – Вимоги до датчика температури та вологості зовнішнього блока

Вимога	Обґрунтування
Вимірювання температури	Необхідне для контролю зовнішніх умов
Вимірювання вологості	Дає змогу оцінити стан повітря зовні
Робота з напругою 3,3 В	Відповідає живленню зовнішнього блока
Цифровий інтерфейс	Зменшує похибки та спрощує підключення
Низьке енергоспоживання	Важливо для автономного живлення
Стабільність вимірювань	Важлива для роботи у змінних зовнішніх умовах

Для вибору датчика температури та вологості зовнішнього блока буде розглянуто характеристики трьох варіантів: SHT40, DS18B20 та DHT22.

На рисунку 2.29 показано зовнішній вигляд датчика SHT40 [48].

На рисунку 2.30 показано зовнішній вигляд датчика DS18B20 [49].

На рисунку 2.31 показано зовнішній вигляд датчика DHT22 [50].

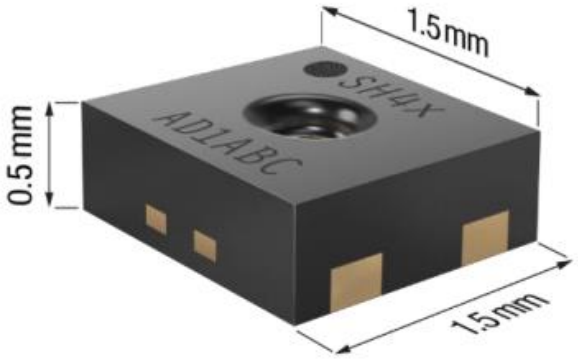


Рисунок 2.29 – Зовнішній вигляд датчика SHT40

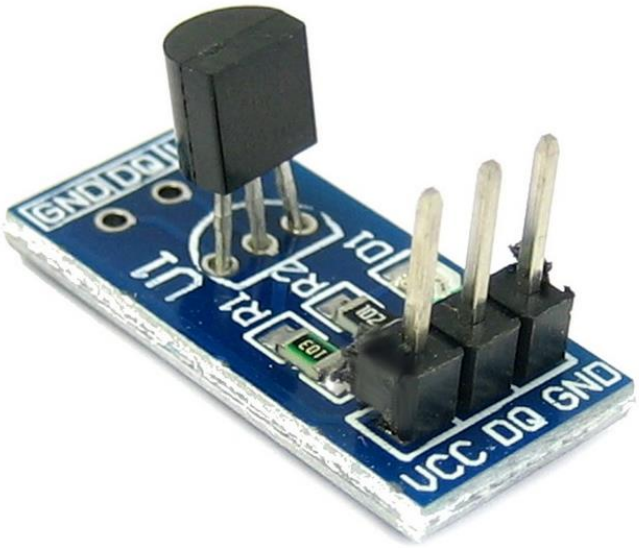


Рисунок 2.30 – Зовнішній вигляд датчика DS18B20



Рисунок 2.31 – Зовнішній вигляд датчика DHT22

У таблиці 2.16 наведено порівняння характеристик можливих варіантів датчиків температури та вологості для зовнішнього блока.

Таблиця 2.16 – Порівняння характеристик можливих варіантів датчиків температури та вологості для зовнішнього блока

Характеристика	SHT40	DS18B20	DHT22
1	2	3	4
Вимірювані параметри	Температура, вологість	Температура	Температура, вологість
Інтерфейс	I^2C [48]	1-Wire [49]	1-Wire [50]
Діапазон вимірювання вологості	Від 0 % до 100 % [48]	-	Від 0 % до 100 % [50]
Діапазон вимірювання температури	Від -40 ºС до +125 ºС [48]	Від -55 °С до +125 °С [49]	Від -40 ºС до +80 ºС [50]
Точність вимірювання вологості	Приблизно 1,8 % [48]	-	Приблизно 2 % [50]
Точність вимірювання температури	Приблизно 0,2 °С [48]	0,5 °С [49]	Приблизно 0,5 °С [50]
Напруга живлення	Від 1,08 В до 3,6 В [48]	Від 3 В до 5 В [49]	Від 3,6 В до 6 В [50]
Кількість виводів	4 (SDA, SCL, VDD, VSS) [48]	3 (GND, DQ, VDD) [49]	4 (VDD, DATA, NC, GND) [50]
Розмір	1,5 мм х 1,5 мм х 0,5 мм [48]	21 мм х 10 мм [49]	14 мм х 18 мм х 5,5 мм або 22 мм х 28 мм х 5 мм [50]

Продовження таблиці 2.16

1	2	3	4
Споживання енергії	Середній струм 0,4 мкА (при частоті 1 Гц), струм датчика холостого ходу 80 нА [48]	Від 1 мА до 1,5 мА (активний струм) [49]	Від 1 мА до 1,5 мА (під час вимірювання), від 40 мкА до 50 мкА (у режимі очікування) [50]

За результатами порівняння для зовнішнього блока було обрано датчик SHT40, оскільки він найкраще відповідає вимогам автономного сенсорного блока. На відміну від DS18B20, який вимірює лише температуру, SHT40 дозволяє одночасно контролювати два основні параметри зовнішнього середовища – температуру та відносну вологість. Це зменшує кількість окремих датчиків у системі та спрощує конструкцію зовнішнього блока.

Порівняно з DHT22, датчик SHT40 має ширший діапазон вимірювання температури та кращу точність вимірювання температури, що є важливим для стабільного контролю параметрів навколишнього середовища. За точністю вимірювання вологості SHT40 також має перевагу, оскільки його похибка становить приблизно 1,8 %, тоді як у DHT22 – близько 2 %.

Важливою перевагою SHT40 є підтримка інтерфейсу I²C, що забезпечує зручне підключення до мікроконтролера зовнішнього блока та дозволяє використовувати спільну шину з іншими цифровими датчиками. Крім того, SHT40 працює в діапазоні живлення від 1,08 В до 3,6 В, що відповідає живленню зовнішнього блока на 3,3 В.

Третім кроком буде вибір радіомодуля для зв’язку між блоками.

Насамперед важливо обрати бездротову технологію, за допомогою якої дані будуть передаватися з зовнішнього блока до внутрішнього.

У таблиці 2.17 наведено порівняння бездротових технологій зв’язку для системи контролю параметрів навколишнього середовища [51].

Таблиця 2.17 – Порівняння бездротових технологій зв’язку для системи контролю параметрів навколишнього середовища

Параметр	WiFi (2,4 GHz)	BLE 5,0	LoRa
Типова дальність дії (у приміщенні)	Від 30 м до 100 м	Від 10 м до 50 м	Від 1 км до 5 км
Швидкість передачі даних	Від 1 Мбіт/с до 600 Мбіт/с	Від 125 кбіт/с до 2 Мбіт/с	Від 0,3 кбіт/с до 50 кбіт/с
Струм передавання (типовий)	Від 150 мА до 200 мА	Від 10 мА до 15 мА	Від 20 мА до 120 мА
Струм у режимі сну	Приблизно 20 мкА	Від 0,5 мкА до 3 мкА	Від 0,1 мкА до 1 мкА
Робочий частотний діапазон	2,4 ГГц або 5 ГГц	2,4 ГГц	Від 137 МГц до 1020 МГц
Топологія мережі	Зірка (через точку доступу)	P2P / зірка / mesh	Зірка зірок
Необхідна інфраструктура	Wi-Fi роутер	Смартфон або хаб	Шлюз LoRaWAN
Орієнтована вартість модуля	Від 70 грн до 231 грн	Від 46 грн до 185 грн	Від 231 грн до 694 грн

За результатами порівняння бездротових технологій зв’язку можна зробити висновок, що для розроблюваної системи найбільш доцільним є використання технології LoRa. Основною її перевагою є значно більша дальність передавання даних порівняно з Wi-Fi та BLE 5,0. Це важливо, оскільки зовнішній модуль може бути розміщений на відстані від внутрішнього блока, а зв’язок між ними має залишатися стабільним. Крім того, LoRa характеризується низьким струмом споживання в режимі сну, що є важливим

для зовнішнього блока з автономним живленням. Хоча швидкість передавання даних у LoRa є нижчою, ніж у Wi-Fi та BLE 5,0, для даної системи це не є суттєвим недоліком, оскільки передаються невеликі пакети з результатами вимірювань.

Третім кроком доцільно виконати вибір радіомодуля.

У таблиці 2.18 наведено вимоги до радіомодуля.

Таблиця 2.18 – Вимоги до радіомодуля

Вимога	Обґрунтування
Достатня дальність зв’язку	Зовнішній блок може бути розміщений на відстані від внутрішнього блока
Низьке енергоспоживання	Зовнішній блок працює від акумулятора, тому модуль зв’язку не повинен швидко розряджати джерело живлення
Передавання невеликих пакетів даних	Система передає лише значення температури, вологості, УФ-індексу, стану грози та напруги акумулятора
Стійкість до завад	Для виробничих приміщень важлива стабільність зв’язку в умовах електромагнітних завад
Робота з напругою 3,3 В	Необхідна для сумісності з мікроконтролерами Arduino Pro Mini 3,3 V та ESP32
Простота підключення до мікроконтролера	Модуль повинен мати стандартний інтерфейс SPI або UART

Для вибору радіомодуля буде розглянуто характеристики трьох варіантів: SX1278, nRF24L01 та HC-12 SI4463.

На рисунку 2.32 показано зовнішній вигляд SX1278 LoRa [52].

На рисунку 2.33 показано зовнішній вигляд nRF24L01 [53].

На рисунку 2.34 показано зовнішній вигляд HC-12 SI4463 [54].



Рисунок 2.32 – Зовнішній вигляд радіомодуля SX1278 LoRa

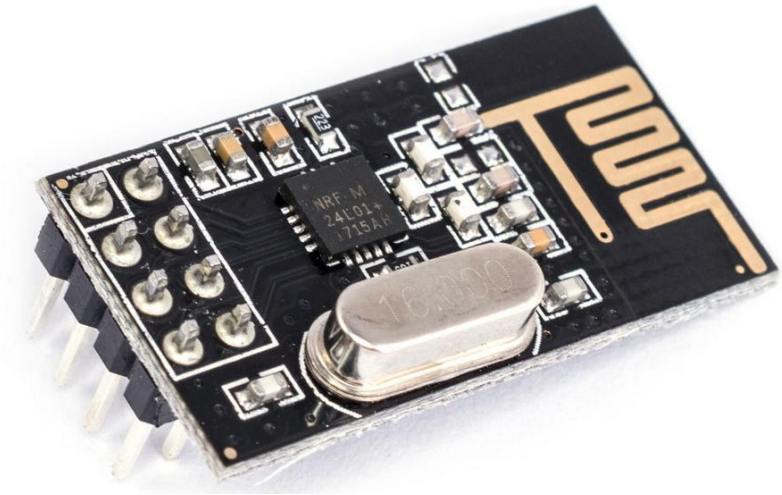


Рисунок 2.33 – Зовнішній вигляд радіомодуля nRF24L01

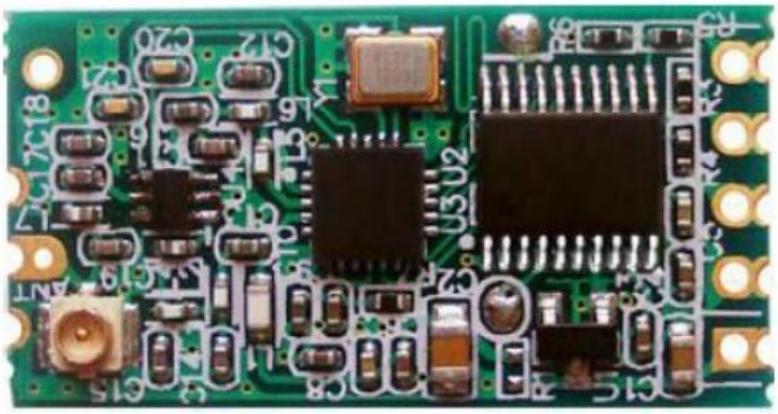


Рисунок 2.34 – Зовнішній вигляд радіомодуля HC-12 SI4463

У таблиці 2.19 наведено порівняння характеристик можливих варіантів радіомодуля.

Таблиця 2.19 – Порівняння характеристик можливих варіантів радіомодуля

Характеристика	SX1278 LoRa	nRF24L01	HC-12 SI4463
1	2	3	4
Частота	433 МГц [52]	2,4 ГГц [53]	433 МГц [54]
Інтерфейс	SPI [52]	SPI [53]	UART [54]
Напруга живлення	Від 1,8 В до 3,6 В [55]	Від 1,9 В до 3,6 В [53]	Від 3,2 В до 5,5 В [54]
Потужність передавання	+20 дБм [52]	0 дБм [56]	+20 дБм [54]
Чутливість приймача	До -139 дБм [55]	До -82 дБм [56]	-117 дБм [54]
Струм у режимі передавання	10,8 мА [55]	11,3 мА (при вихідній потужності 0 дБм) [56]	До 100 мА [54]
Струм у режимі приймання	100 мА (при +20 дБм) [55]	12,3 мА [56]	16 мА [54]
Струм у режимі сну	Менше 0,2 мкА [55]	900 нА [56]	80 мкА [54]
Розмір	17,3 мм х 17 мм [55]	18 мм х 26 мм х 10 мм [56]	27,8 мм х 14,4 мм х 4 мм [54]
Швидкість передачі даних	До 300 кбіт/с [52]	2 Мбіт/с [53]	До 115,2 кбіт/с [54]
Робоча температура	Від -40 °С до +85 °С [55]	Від -40 °С до +85 °С [56]	Від -20 °С до +60 °С [54]
Температура зберігання	Від -40 °С до +125 °С [55]	Від -40 °С до +125 °С [56]	Від -40 °С до +85 °С

Продовження таблиці 2.19

1	2	3	4
Орієнтовна дальність передачі	До 10 км у відкритому просторі за прямої видимості [52]	До 100 м на відкритому просторі [56]	До 1000 м [54]

За результатами порівняння доцільно обрати радіомодуль SX1278 LoRa. Основною перевагою цього модуля є найбільша орієнтовна дальність передавання серед розглянутих варіантів – до 10 км у відкритому просторі за умов прямої видимості. Для розроблюваної системи це є важливим параметром, оскільки зовнішній блок розміщений на відстані від внутрішнього блока та між ними можуть бути перешкоди.

Порівняно з nRF24L01, модуль SX1278 LoRa має значно вищу чутливість приймача, що підвищує стабільність зв’язку та дозволяє приймати слабші сигнали. Також SX1278 працює на частоті 433 МГц, яка краще підходить для передавання даних на більші відстані, ніж частота 2,4 ГГц, що використовується nRF24L01. Хоча nRF24L01 має менше споживання під час передавання, його дальність обмежена приблизно 100 м, тому для зв’язку між окремими блоками системи він є менш доцільним.

Порівняно з HC-12 SI4463, модуль SX1278 LoRa має кращу чутливість приймача, менший струм у режимі сну та більшу орієнтовну дальність передавання. Обидва модулі працюють на частоті 433 МГц і мають потужність передавання +20 дБм, однак SX1278 забезпечує дальність до 10 км, тоді як HC-12 – до 1000 м. Крім того, струм у режимі сну SX1278 становить менше 0,2 мкА, що є кращим показником порівняно з 80 мкА у HC-12. Це особливо важливо для зовнішнього блока, який працює від акумулятора.

Отже, SX1278 LoRa найкраще відповідає вимогам розроблюваної системи, оскільки забезпечує велику дальність зв’язку, високу чутливість

приймача, низьке споживання у режимі сну, компактні розміри та сумісність з мікроконтролерами через інтерфейс SPI.

Четвертим кроком доцільно вибрати стабілізатор напруги, який потрібен для формування стабільної напруги живлення 3,3 В від акумулятора 18650.

У таблиці 2.20 наведено вимоги до стабілізатора напруги.

Таблиця 2.20 – Вимоги до стабілізатора напруги

Вимога	Обґрунтування
Вихідна напруга 3,3 В	Необхідна для живлення мікроконтролера та датчиків
Низький власний струм споживання	Важливо для автономної роботи
Робота від Li-ion акумулятора	Джерелом живлення є акумулятор 18650
Достатній вихідний струм	Має забезпечити живлення мікроконтролера, датчиків і радіомодуля
Простота використання	Спрощує схему живлення

Для вибору стабілізатора напруги буде розглянуто характеристики трьох варіантів: MCP1700-3,3, AMS1117-3,3 та LM1117-3,3.

На рисунку 2.35 показано зовнішній вигляд MCP1700-3,3 [57].

На рисунку 2.36 показано зовнішній вигляд AMS1117-3,3 [58].

На рисунку 2.37 показано зовнішній вигляд LM1117-3,3 [59].



Рисунок 2.35 – Зовнішній вигляд MCP1700-3,3

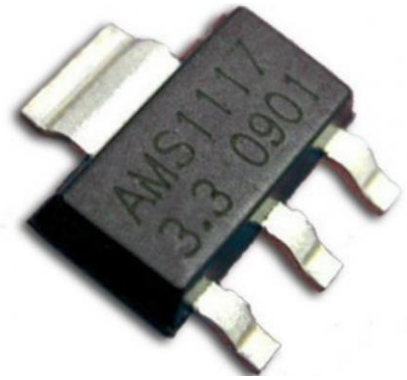


Рисунок 2.36 – Зовнішній вигляд AMS1117-3,3

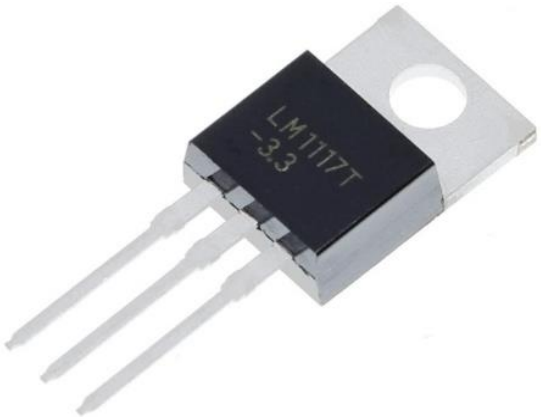


Рисунок 2.37 – Зовнішній вигляд LM1117-3,3

У таблиці 2.21 наведено порівняння характеристик можливих варіантів стабілізатора напруги.

Таблиця 2.21 – Порівняння характеристик можливих варіантів стабілізатора напруги

Характеристика	MCP1700-3,3	AMS1117-3,3	LM1117-3,3
1	2	3	4
Тип перетворювача	Лінійний LDO [57]	Лінійний LDO [58]	Лінійний LDO [59]
Вихідна напруга	3,3 В [57]	3,3 В [58]	3,3 В [59]
Діапазон вхідної напруги	Від 2,3 В до 6 В [57]	До 15 В [61]	До 20 В [59]

Продовження таблиці 2.21

1	2	3	4
Максимальний вихідний струм	250 мА [57]	800 мА [58]	800 мА [59]
Струм спокою	1,6 мкА [60]	5 мА (типово), 10 мА (максимально) [61]	5 мА (при роботі від 0 °C до 125 °C) [59]
Падіння напруги	178 мВ (при 250 мА) [60]	1,1 мВ (типове), 1,3 мВ (максимальне) [61]	1,1 В (мінімальне) [59]
Робоча температура	Від -40 °C до +125 °C [60]	Від -40 °C до +125 °C [58]	Від 0 °C до +120 °C [59]
Температура зберігання	Від -65 °C до +150 °C [60]	Від -65 °C до +150 °C [61]	Від -65 °C до +150 °C [59]

За результатами порівняння для стабілізації напруги зовнішнього блока обрано MCP1700-3,3. Основною перевагою цього стабілізатора є малий струм спокою – 1,6 мкА, що значно менше порівняно з AMS1117-3,3 та LM1117-3,3, у яких струм спокою становить одиниці мА. Це особливо важливо для зовнішнього блока, який живиться від акумулятора 18650 та більшу частину часу може перебувати в режимі очікування. Крім того, MCP1700 має мале падіння напруги, що дозволяє ефективніше використовувати заряд акумулятора. Незважаючи на менший максимальний вихідний струм, 250 мА достатньо для живлення мікроконтролера, датчиків і радіомодуля в межах даної системи. Тому MCP1700-3,3 є найбільш доцільним вибором для автономного зовнішнього блока.

П’ятим кроком доцільно виконати вибір контролера заряду акумулятора.

Контролер заряду потрібен для безпечного заряджання літій-іонного акумулятора 18650.

У таблиці 2.22 наведено вимоги до контролера заряду акумулятора.

Таблиця 2.22 – Вимоги до контролера заряду акумулятора

Вимога	Обґрунтування
Підтримка одного Li-ion акумулятора	У системі використовується один акумулятор 18650
Алгоритм заряджання CC/CV	Є стандартним для Li-ion акумуляторів
Можливість роботи з сонячною панеллю	Зовнішній блок може мати автономне живлення
Простота підключення	Важлива для практичної реалізації
Доступність модуля	Компонент має бути доступним для придбання

Для вибору контролера заряду акумулятора буде розглянуто характеристики трьох варіантів: CN3065, TP4056 та MCP73831.

На рисунку 2.38 показано зовнішній вигляд CN3065 [62].

На рисунку 2.39 показано зовнішній вигляд TP4056 [63].

На рисунку 2.40 показано зовнішній вигляд MCP73831 [64].

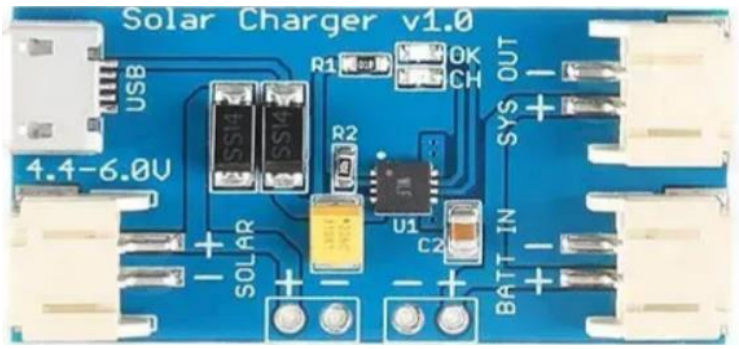


Рисунок 2.38 – Зовнішній вигляд CN3065



Рисунок 2.39 – Зовнішній вигляд TP4056



Рисунок 2.40 – Зовнішній вигляд MCP73831

У таблиці 2.23 наведено порівняння характеристик можливих варіантів контролера заряду акумулятора.

Таблиця 2.23 – Порівняння характеристик можливих варіантів контролера заряду акумулятора

Характеристика	CN3065	TP4056	MCP73831
1	2	3	4
Тип мікросхеми	Лінійний контролер заряду Li-ion/Li-Pol	Лінійний контролер заряду Li-ion	Лінійний контролер заряду Li-ion/Li-Pol
Кількість акумуляторів	1 Li-ion / Li-Pol	1 Li-ion	1 Li-ion / Li-Pol
Алгоритм заряду	CC/CV	CC/CV	CC/CV
Діапазон вхідної напруги	Від 4,4 В до 6 В [62]	Від 4 В до 8 В [63]	Від 3,75 В до 6 В [64]
Номінальна напруга повного заряду	4,2 В [62]	4,2 В [63]	4,20 В, 4,35 В, 4,40 В, 4,50 (чотири варіанти регулювання напруги) [64]
Діапазон напруги заряду	Від 4,158 В до 4,242 В	Від 4,137 В до 4,263 В [63]	Від 4,168 В до 4,232 В [64]

Продовження таблиці 2.23

1	2	3	4
Точність напруги заряду	Приблизно 1 % [62]	Приблизно 1,5 % [63]	Приблизно 0,75 % [64]
Максимальний струм заряду	До 1000 мА	До 1000 мА [63]	Від 15 мА до 500 мА [64]
Автоматичне повторне заряджання	Є	Є	Є
Контроль температури акумулятора	Є, TEMP pin [62]	Є, TEMP pin [63]	Немає окремого TEMP pin
Терморегулювання мікросхеми	Є, температура кристала приблизно 115 °C [62]	Є, температура кристала 145 °C [63]	Є, теплове відключення при 150 °C [64]
Робочий температурний діапазон	Від -40 °C до +85 °C [62]	Від -40 °C до +85 °C	Від -40 °C до +85 °C [64]
Температура зберігання	Від -65 °C до +150 °C [62]	Від -40 °C до +125 °C	Від -65 °C до +150 °C [64]
Особливість для сонячного живлення	Є 8-бітний ADC для автоматичного регулювання струму заряду за можливостями джерела	Орієнтований переважно на USB або адаптер живлення	Компактний, але без спеціальної функції підлаштування під сонячну панель

За результатами порівняння для реалізації вузла заряджання акумулятора зовнішнього блока обрано CN3065. Ця мікросхема підтримує заряджання одного Li-ion/Li-Pol акумулятора за алгоритмом CC/CV, має номінальну

напругу повного заряду 4,2 В, діапазон вхідної напруги від 4,4 В до 6 В та дозволяє задавати струм заряду до 1000 мА. Такі характеристики відповідають вимогам зовнішнього блока, який живиться від акумулятора 18650 та потребує безпечного й стабільного заряджання.

Основною перевагою CN3065 порівняно з TP4056 та MCP73831 є придатність до роботи із сонячним живленням. CN3065 має вбудований 8-бітний АЦП, який дозволяє автоматично регулювати струм заряду залежно від можливостей джерела живлення. Це важливо, оскільки вихідна потужність сонячної панелі змінюється залежно від рівня освітленості. TP4056 також забезпечує струм заряду до 1000 мА, однак переважно орієнтований на живлення від USB або стабільного адаптера. MCP73831 має кращу точність напруги заряду, але його максимальний струм заряду обмежений – 500 мА, а спеціальної функції підлаштування під сонячне джерело живлення він не має.

Отже, CN3065 є найбільш доцільним вибором для зовнішнього блока, оскільки поєднує достатній струм заряду, підтримку стандартного алгоритму заряджання Li-ion акумуляторів, низьке споживання в режимі очікування та можливість ефективнішої роботи із сонячною панеллю.

Шостим етапом є вибір засобу для контролю грозової активності.

У межах розроблюваної системи цей елемент потрібен для фіксації електричних розрядів в атмосфері, визначення факту наближення грози та доповнення даних про зовнішні погодні умови. Для цього доцільно використати спеціалізований датчик AS3935, оскільки він призначений саме для реєстрації блискавичної активності, оцінювання відстані до грозового фронту та аналізу характеру зафіксованих подій. Через вузьке призначення мікросхеми її вибір доцільніше обґрунтовувати не порівнянням з універсальними сенсорами, а аналізом основних технічних характеристик.

На рисунку 2.41 показано зовнішній вигляд датчика AS3935 [65].



Рисунок 2.41 – Зовнішній вигляд датчика AS3935

Основні характеристики датчика AS3935 наведено в таблиці 2.24.

Таблиця 2.24 – Основні характеристики датчика AS3935

Характеристика	Опис
1	2
Вхідна напруга	Від 3,3 В до 5,5 В [65]
Максимальна дальність виявлення	40 км [65]
Кількість кроків оцінки відстані	15 кроків [65]
Роздільна здатність виявлення відстані	1 ~ 4 км [65]
Визначення інтенсивності блискавки	Є [66]
Роздільна здатність виявлення інтенсивності	21 біт (0 ~ 16777201) [65]
Адреса I^2C	0x03, 0x02, 0x01 [65]
Інтерфейс	Gravity I^2C [65]
Логічний рівень інтерфейсу	0-VCC [65]
Розмір плати	30 мм х 22 мм [65]
Робочий температурний діапазон	Від -40 °C до +85 °C [66]
Температура зберігання	Від -65 °C до +150 °C [66]
Вхідний струм (стійкість до замикання)	Від -100 мА до 100 мА [66]

Продовження таблиці 2.24

1	2
Відносна вологість без конденсації	Від 5 % до 85 % [66]
Струм у режимі power-down без внутрішнього стабілізатора	Від 1 мкА до 2 мкА [66]
Струм у режимі power-down з внутрішнім стабілізатором	Від 8 мкА до 15 мкА [66]
Струм у режимі очікування (listening mode) без внутрішнього стабілізатора	Від 60 мкА до 80 мкА [66]
Струм у режимі очікування (listening mode) з внутрішнім стабілізатором	Близько 70 мкА [66]
Струм у режимі перевірки сигналу	Близько 350 мкА [66]
Тривалість перевірки сигналу після виявлення блискавки	1 с [66]
Тривалість перевірки сигналу після виявлення завади	1,5 с [66]
Вихід переривання	IRQ [66]
Вбудований алгоритм відхилення штучних завад	Є [66]
Вимірювання рівня шуму	Є [66]
Налаштування чутливості	Є, через програмовані регістри [66]
Корпус мікросхеми	16LD MLPQ, 4 мм × 4 мм [66]

Для зовнішнього блока розроблюваної системи обрано AS3935 – спеціалізовану мікросхему для реєстрації блискавичної активності та оцінювання наближення грози. Вона дозволяє фіксувати електричні розряди в атмосфері на відстані до 40 км, визначати орієнтовну відстань до джерела події та оцінювати її інтенсивність.

Особливістю AS3935 є те, що орієнтовна відстань до грозового фронту не розраховується мікроконтролером зовнішнього блока окремо, а формується внутрішніми алгоритмами самої мікросхеми. Після виявлення події датчик через вихід переривання IRQ повідомляє мікроконтролер про необхідність зчитування даних. Далі мікроконтролер звертається до регістрів AS3935 через інтерфейс I2C, визначає тип зафіксованої події, а у разі підтвердження блискавичної активності додатково зчитує орієнтовну відстань до грозового фронту та значення інтенсивності події. Отримані дані включаються до інформаційного пакета зовнішнього блока та передаються до внутрішнього блока системи для подальшої обробки й відображення.

Важливою перевагою AS3935 є низьке енергоспоживання, що має суттєве значення для автономного зовнішнього блока з живленням від акумулятора 18650. У режимі очікування датчик постійно контролює наявність характерних сигналів, споживаючи від 60 мкА до 80 мкА без використання внутрішнього стабілізатора. У режимі power-down струм зменшується від 1 мкА до 2 мкА, що дає змогу зменшити загальне споживання системи. Також AS3935 має вихід переривання IRQ. Завдяки цьому мікроконтролер може перебувати в енергоощадному режимі та реагувати лише на зафіксовану подію: блискавку, заваду або підвищений рівень шуму. Такий підхід зменшує потребу в постійному опитуванні датчика та спрощує програмну обробку. Окремою перевагою є вбудований алгоритм відхилення штучних електромагнітних завад. Мікросхема аналізує форму вхідного сигналу та дозволяє відрізняти блискавичну активність від перешкод, створених електронними пристроями. Крім того, датчик може повідомляти про надмірний рівень шуму, за якого коректна реєстрація подій може бути ускладнена.

Сьомим кроком доцільно виконати вибір датчика УФ-випромінювання, який потрібен для оцінки УФ-індексу зовні.

У таблиці 2.25 наведено вимоги до датчика УФ-випромінювання.

Таблиця 2.25 – Вимоги до датчика УФ-випромінювання

Вимога	Обґрунтування
Реєстрація УФ-випромінювання	Потрібна для оцінки зовнішніх умов
Сумісність з мікроконтролером	Сигнал має зчитуватися Arduino Pro Mini
Робота від 3,3 В	Відповідає живленню зовнішнього блока
Простота підключення	Важлива для практичної реалізації

Для вибору датчика УФ-випромінювання буде розглянуто характеристики трьох варіантів: GUVA-S12SD, ML8511 та VEML6075.

На рисунку 2.42 показано зовнішній вигляд GUVA-S12SD [67].

На рисунку 2.43 показано зовнішній вигляд ML8511 [68].

На рисунку 2.44 показано зовнішній вигляд VEML6075 [69].



Рисунок 2.42 – Зовнішній вигляд датчика GUVA-S12SD

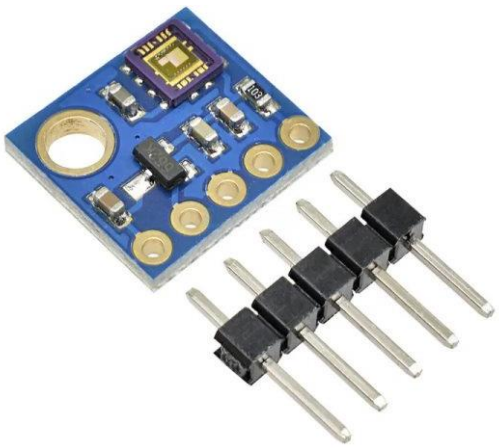


Рисунок 2.43 – Зовнішній вигляд датчика ML8511

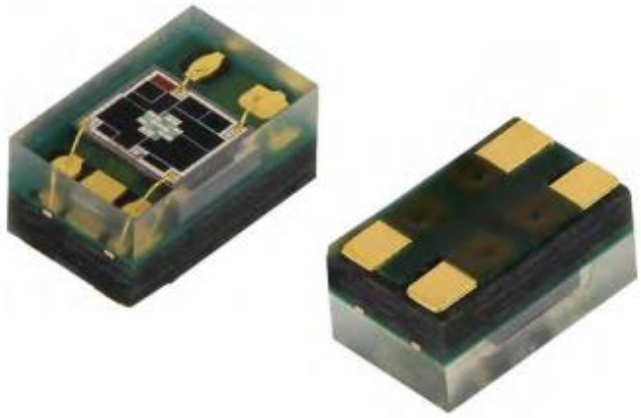


Рисунок 2.44 – Зовнішній вигляд датчика VEML6075

У таблиці 2.26 наведено порівняння характеристик можливих варіантів датчика УФ-випромінювання.

Таблиця 2.26 – Порівняння характеристик можливих варіантів датчика УФ-випромінювання

Характеристика	GUVA-S12SD	ML8511	VEML6075
1	2	3	4
Напруга живлення	Від 2,5 В до 5 В [67]	Від 2,7 В до 3,6 В [68]	Від 1,7 В до 3,6 В (для мікросхеми), від 3,3 В до 5 В (для модуля) [69]
Робочий струм	1 мА [67]	300 мкА (типовий) [68]	480 мкА (для мікросхеми), 700 мкА (для модуля) [69]
Характер вихідного сигналу	Лінійний [67]	Лінійний [68]	Цифровий результат після внутрішньої обробки [69]
Розміри	11 мм х 27 мм [67]	30 мм × 22 мм [68]	22 мм × 30 мм [69]
Діапазон вимірювань	Від 240 нм до 370 нм [67]	Від 280 нм до 390 нм [68]	Від 315 нм до 340 нм (UVB), від 350 нм до 375 нм (UVA) [69]

Продовження таблиці 2.26

1	2	3	4
Тип світлочутливого елемента	Діоди Шотткі на основі GaN [67]	УФ-сенсор з вбудованим підсилювачем [68]	Інтегрований UVA/UVB цифровий сенсор [69]
Чутливість	Висока (0,14 A/W при 300 нм) [67]	365 нм (максимальна) [68]	Окремі канали UVA та UVB [69]
Стабільність	Висока	Висока	Висока
Робоча температура	Від -30 °C до +85 °C [67]	Від -20 °C до +70 °C [68]	Від -40 °C до +85 °C [69]
Температура зберігання	Від -40 °C до +90 °C [67]	Від -30 °C до +85 °C [68]	Від -40 °C до +85 °C [69]
Інтерфейс	ADC [67]	ADC [68]	I^2C [69]
Тип виходу	Аналоговий [67]	Аналоговий [68]	Цифровий [69]
Можливість купівлі в Україні	Є	Немає	Немає

За результатами порівняння для вимірювання УФ-індексу обрано датчик GUVA-S12SD. Він відповідає вимогам зовнішнього блока, оскільки має широкий діапазон вимірювання від 240 нм до 370 нм, простий аналоговий вихід та може підключатися безпосередньо до входу ADC мікроконтролера Arduino Pro Mini 3,3 В. Датчик має лінійну характеристику вихідного сигналу, високу чутливість 0,14 A/W при 300 нм та робочий температурний діапазон від -30 °C до +85 °C, що дозволяє використовувати його у зовнішньому блоці системи.

Порівняно з ML8511, датчик GUVA-S12SD має ширший робочий температурний діапазон та менші габаритні розміри. Порівняно з VEML6075, він простіший у підключенні, оскільки не потребує цифрового інтерфейсу I^2C і

складнішої програмної обробки даних. Крім того, GUVA-S12SD є доступним для придбання в Україні, тоді як розглянуті альтернативні варіанти мають обмежену доступність. Отже, GUVA-S12SD є найбільш доцільним вибором для реалізації функції вимірювання УФ-індексу в автономній розроблюваній системі.

Восьмим кроком доцільно виконати вибір способу вимірювання напруги акумулятора 18650.

Для контролю стану живлення зовнішнього блока буде розглянуто два варіанти: резистивний подільник напруги та цифровий датчик INA219.

Резистивний подільник є найпростішим способом вимірювання напруги акумулятора, оскільки складається лише з двох резисторів і підключається до аналогового входу мікроконтролера. Однак його функціональність обмежується лише вимірюванням напруги. Він не дозволяє визначити струм споживання модуля та струм заряджання акумулятора, що є важливим для автономної системи з акумуляторним і сонячним живленням [70].

На рисунку 2.45 показано зовнішній вигляд резистивного подільника [70].



Рисунок 2.45 – Зовнішній вигляд резистивного подільника

На відміну від подільника напруги, датчик INA219 дозволяє вимірювати напругу шини та постійний струм. Він підключається до мікроконтролера через інтерфейс I²C (швидкість інтерфейсу 3,4 МГц), тому не займає аналоговий вхід

Arduino Pro Mini. Це важливо, оскільки аналоговий вхід може використовуватися для інших датчиків. Крім того, використання INA219 дає змогу контролювати не лише рівень напруги акумулятора, а й фактичне енергоспоживання зовнішнього блока. Цей датчик працює з напругою живлення від 3 В до 5 В, має 12-бітну роздільну здатність вимірювання, максимальну вимірювану напругу шини до 26 В, максимальний вимірюваний струм до 3,2 А та точність вимірювання струму 0,8 мА. Робочий температурний діапазон датчика становить від -40 °C до +85 °C [71].

На рисунку 2.46 показано зовнішній вигляд датчика INA219 [71].



Рисунок 2.46 – Зовнішній вигляд датчика INA219

Отже, для зовнішнього блока доцільно використати INA219, оскільки він забезпечує ширші можливості контролю живлення порівняно з простим резистивним подільником. Незважаючи на більшу вартість, INA219 є більш інформативним рішенням, оскільки дозволяє вимірювати напругу та струм, що особливо важливо для автономної автоматизованої системи контролю параметрів навколишнього середовища з акумулятором 18650 та можливістю заряджання від сонячної панелі.

2.6 Застосування теорії автоматичного управління в системах контролю параметрів навколишнього середовища

Стійкість систем автоматичного управління (САУ) є базовою умовою для працездатності цієї системи [72], а також передбачає вимогу згасання перехідного процесу в часі.

Рівняння характеристичне для лінійної неперервної САУ має вигляд:

$$a_0\lambda^n + a_1\lambda^{n-1} + \cdots + a_n = 0, \qquad (2.1)$$

де a_i – задані коефіцієнти;

n – порядок системи.

Для того, щоб стверджувати, що система є стійкою достатньо лише того, що всі корені даного рівняння системи матимуть від'ємні дійсні частини $\mathrm{Re}\lambda_i < 0$ [73].

Всі корені, що являються негативними дійсними частинами називаються лівими, оскільки у комплексній площині коренів вони знаходяться у лівій частині від уявної осі, а ось корені з позитивними дійсними – правими.

При дослідженні стійкості за допомогою алгебраїчних критеріїв, потрібно в першу чергу перевірити виконання всіх необхідних умов стійкості, через те, що ця перевірка не потребує розрахунків і при невиконанні даної умови стійкості розрахунки вже не потрібні.

Основною умовою стійкості системи полягає в тому, що всі коефіцієнти рівняння характеристичного повинні мати один знак. Якщо ця умова не виконується, то система буде нестійкою. У випадку виконання умови, при 3 порядку система може бути стійкою або нестійкою, а у випадку першого та другого порядку даної умови буде достатньо.

Основним критерієм стійкості є критерій Гурвіца. При цьому критерії спочатку потрібно побудувати головний визначник Гурвіца [74]. Даний критерій будується за таким правилом: на головній діагоналі розташовують

коефіцієнти у порядку збільшення їх індексів, починаючи з a_1 та закінчуючи a_n. Для кожного стовпчика під час руху від елемента, який розташований на головній діагоналі, вверх індекси коефіцієнтів будуть збільшуватись, а вниз – зменшуватись. При цьому на місці елементів, які мають індекси більше за n (під час руху вверх), та індексами, що менше нуля (під час руху вниз) розставляються нулі.

$$\Delta_n = \begin{vmatrix} a_1 & a_3 & a_5 & \dots & 0 \\ a_0 & a_2 & a_4 & \dots & 0 \\ 0 & a_1 & a_3 & \dots & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & a_n \end{vmatrix}. \quad (2.2)$$

Якщо викреслити в головному визначникові Гурвіца діагональні мінори, то можна отримати визначники Гурвіца нижчого порядку:

$$\Delta_1 = a_1, \qquad \Delta_2 = \begin{vmatrix} a_1 & a_3 \\ a_0 & a_2 \end{vmatrix}, \qquad \Delta_3 = \begin{vmatrix} a_1 & a_3 & a_5 \\ a_0 & a_2 & a_4 \\ 0 & a_1 & a_3 \end{vmatrix}. \quad (2.3)$$

З даного критерію виходить те, що при третьому порядку необхідна ще додаткова умова стійкості [74]:

$$a_0 > 0,\ \Delta_1 = a_1 > 0,\ \Delta_2 = a_1 a_3 - a_0 a_3 > 0,\ \Delta_3 = a_3 \Delta_2 > 0. \quad (2.4)$$

У розроблюваній системі контролю параметрів навколишнього середовища положення теорії автоматичного управління можуть бути застосовані для організації замкненого контуру контролю та регулювання параметрів мікроклімату. Об’єктом управління у цьому випадку є виробниче приміщення, у якому змінюються температура, вологість, концентрація вуглекислого газу та інші параметри середовища.

Датчики виконують функцію елементів зворотного зв’язку, оскільки вони постійно вимірюють фактичні значення параметрів та передають їх до мікроконтролера. Мікроконтролер порівнює отримані значення із заданими допустимими межами. У разі відхилення параметра від норми формується керуючий вплив або попереджувальний сигнал.

Наприклад, при перевищенні допустимого рівня CO_2 система може сформувати сигнал для увімкнення вентиляції або повідомлення користувачу про необхідність провітрювання приміщення. При підвищенні температури може бути активовано систему охолодження або вентиляції, а при недостатній вологості – зволоження повітря. Таким чином, система працює за принципом зворотного зв’язку, що є одним із базових принципів теорії автоматичного управління.

Для уникнення нестабільної роботи системи важливо забезпечити стійкість процесу регулювання. Це означає, що після виникнення відхилення система повинна поступово повертати параметри до допустимих значень без коливань, частого перемикання виконавчих пристроїв або перевищення заданих меж. Для простих систем контролю мікроклімату може застосовуватися порогове керування з гістерезисом, а для складніших систем – пропорційне або ПІД-регулювання.

3 РЕАЛІЗАЦІЯ АВТОМАТИЗОВАНОЇ СИСТЕМИ КОНТРОЛЮ ПАРАМЕТРІВ НАВКОЛИШНЬОГО СЕРЕДОВИЩА У ВИРОБНИЧИХ ПРИМІЩЕННЯХ

3.1 Вибір середовища розробки

Для реалізації програмної частини автоматизованої системи контролю параметрів навколишнього середовища у виробничих приміщеннях було обрано середовище Visual Studio Code з використанням розширення PlatformIO. Такий вибір обумовлений необхідністю розробки програмного забезпечення для мікроконтролерних платформ, підключення зовнішніх бібліотек, компіляції програмного коду та завантаження прошивки до мікроконтролера.

Visual Studio Code є сучасним редактором коду, який підтримує роботу з різними мовами програмування та може бути розширений за допомогою додаткових модулів. У межах даної роботи він використовувався як основне середовище для написання, редагування та структурування програмного коду системи.

Для роботи з мікроконтролерами було використано розширення PlatformIO. Воно дозволяє створювати проєкти для різних апаратних платформ, налаштовувати параметри плати, підключати необхідні бібліотеки, виконувати компіляцію програми та завантажувати її до мікроконтролера. Також PlatformIO надає можливість використовувати монітор послідовного порту, що є важливим під час перевірки роботи датчиків, виведення діагностичних повідомлень та налагодження роботи системи [75].

У розроблюваній системі програмне забезпечення виконує зчитування даних із датчиків, обробку отриманих значень, перевірку параметрів на відповідність допустимим межам, передавання інформації між блоками системи та відображення результатів для користувача. Тому середовище

розробки повинно забезпечувати зручну роботу як з програмною логікою, так і з апаратною частиною системи.

Перевагою використання PlatformIO є зручне керування бібліотеками, підтримка різних мікроконтролерних платформ, автоматизована компіляція проєкту та можливість швидкого налаштування середовища під конкретну плату. Це спрощує процес розробки, зменшує кількість помилок під час налаштування та дозволяє ефективно виконувати тестування програмної частини системи [76].

Отже, використання Visual Studio Code разом із розширенням PlatformIO є доцільним для розробки автоматизованої системи контролю параметрів навколишнього середовища, оскільки таке середовище забезпечує зручне написання коду, роботу з бібліотеками, компіляцію, завантаження прошивки та налагодження роботи мікроконтролерного пристрою.

3.2 Розробка схеми підключення компонентів

Після вибору середовища розробки було виконано розробку схеми підключення компонентів автоматизованої системи контролю параметрів навколишнього середовища у виробничих приміщеннях. Схема підключення необхідна для визначення способу взаємодії між мікроконтролерами, датчиками, модулями зв’язку, дисплеєм, елементами керування та вузлами живлення.

Розроблювана система має розподілену структуру та складається з двох основних функціональних частин: внутрішнього блока та зовнішнього блока. Внутрішній блок розміщується у виробничому приміщенні та виконує функції збору й обробки даних, приймання інформації від зовнішнього блока, відображення показників на дисплеї та забезпечення взаємодії з користувачем. Зовнішній блок призначений для вимірювання параметрів зовнішнього середовища, контролю стану автономного живлення та передавання отриманих даних до внутрішнього блока за допомогою бездротового каналу зв’язку.

Для побудови схеми підключення компонентів було використано графічний редактор draw.io. Його застосування дозволило наочно подати структуру системи, показати зв’язки між основними електронними модулями та розділити компоненти відповідно до їх функціонального призначення. На відміну від середовища програмування, draw.io не використовується для написання коду, а призначений саме для створення візуальної схеми підключення.

Схема підключення компонентів внутрішнього блока (ВБ) автоматизованої системи контролю параметрів навколишнього середовища зображена на рисунку 3.1.

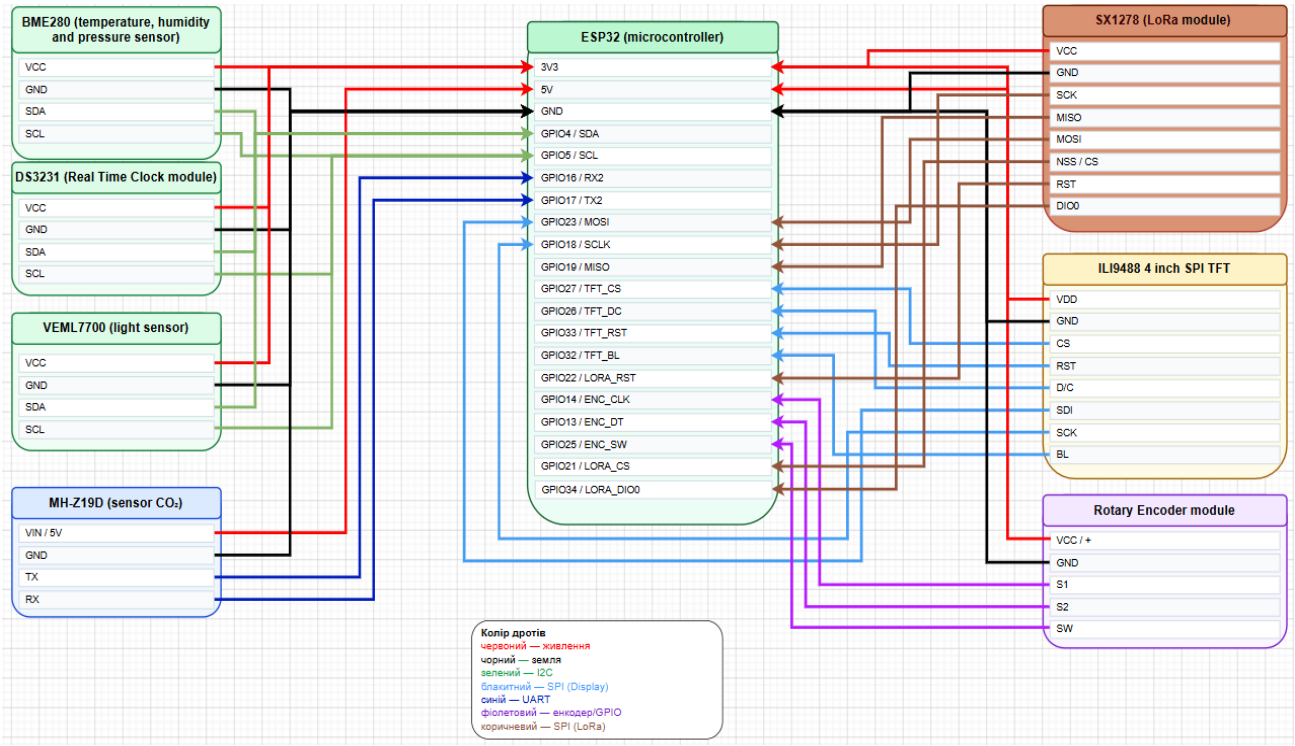


Рисунок 3.1 – Схема підключення компонентів внутрішнього блока системи

Відповідно до розробленої схеми, внутрішній блок побудований на базі мікроконтролера ESP32, який виконує функції центрального керуючого пристрою. До ESP32 підключено датчики внутрішнього середовища, модуль годинника реального часу, дисплей, енкодер керування, датчик концентрації CO_2 та модуль бездротового зв’язку LoRa. Така структура дає змогу одночасно

здійснювати збір вимірювальних даних, приймання інформації із зовнішнього блока, відображення параметрів на екрані та взаємодію користувача з меню системи.

Живлення більшості компонентів внутрішнього блока здійснюється від лінії 3,3 В мікроконтролера ESP32. До цієї лінії підключено модулі BME280, DS3231, VEML7700, SX1278, дисплей ILI9488 та енкодер. Датчик концентрації вуглекислого газу MH-Z19D підключено до лінії 5 В, оскільки для його стабільної роботи потрібна вища напруга живлення. Усі модулі мають спільне підключення до лінії GND, що забезпечує єдиний електричний рівень відліку для коректного обміну сигналами між модулями.

Датчики BME280, DS3231 та VEML7700 підключені до ESP32 через спільну шину I^2C. Лінія SDA підключена до GPIO4 мікроконтролера, а лінія SCL – до GPIO5. Через цю шину ESP32 отримує від датчика BME280 значення температури, відносної вологості та атмосферного тиску, від модуля DS3231 – інформацію про поточний час, а від датчика VEML7700 – значення рівня освітленості. Використання спільної шини I^2C дозволяє підключити декілька цифрових пристроїв до двох сигнальних ліній, що спрощує схему підключення.

Датчик концентрації вуглекислого газу MH-Z19D підключений до мікроконтролера через інтерфейс UART. Його вивід TX з’єднано з GPIO16/RX2 ESP32, а вивід RX – з GPIO17/TX2. Таке перехресне підключення забезпечує двосторонній обмін даними: датчик передає мікроконтролеру виміряне значення концентрації CO_2, а ESP32 може надсилати йому службові команди.

Для відображення інформації використовується 4-дюймовий TFT-дисплей ILI9488, підключений через інтерфейс SPI. Лінія SDI дисплея підключена до GPIO23/MOSI, лінія SCK – до GPIO18/SCLK, а керуючі сигнали CS, RST, D/C та BL підключені відповідно до GPIO27, GPIO33, GPIO26 та GPIO32. Лінія CS використовується для вибору дисплея на SPI-шині, RST – для скидання модуля, D/C – для розділення команд і даних, а BL – для керування підсвічуванням екрана. Дисплей призначений для виведення поточних значень

температури, вологості, атмосферного тиску, концентрації CO_2, освітленості, часу, а також даних, отриманих від зовнішнього блока.

Модуль SX1278, який забезпечує зв’язок LoRa із зовнішнім блоком системи, також підключено через SPI. Він використовує спільні з дисплеєм лінії MOSI, MISO та SCK, які підключені відповідно до GPIO23, GPIO19 та GPIO18. Для вибору саме LoRa-модуля використовується окрема лінія NSS/CS, підключена до GPIO21. Додатково вивід RST модуля підключено до GPIO22, а DIO0 – до GPIO34. Лінія DIO0 використовується для повідомлення мікроконтролера про події модуля, наприклад про приймання пакета даних.

Для керування інтерфейсом користувача застосовано поворотний енкодер. Його сигнальні виводи S1 та S2 підключені до GPIO14 та GPIO13, а кнопка SW – до GPIO25. За допомогою енкодера користувач може переміщуватися між сторінками або пунктами меню на дисплеї, а натискання кнопки використовується для вибору потрібного пункту.

Таким чином, у внутрішньому блоці ESP32 об’єднує кілька інтерфейсів обміну даними: I^2C використовується для сенсорів BME280, DS3231 і VEML7700, UART – для датчика концентрації вуглекислого газу MH-Z19D, SPI використовується для дисплея ILI9488 та LoRa-модуля SX1278, а окремі GPIO-виводи – для енкодера та службових сигналів керування. Така схема забезпечує збирання, оброблення, відображення та бездротове приймання даних у межах внутрішнього блока системи.

Схема підключення компонентів зовнішнього блока (ЗБ) автоматизованої системи контролю параметрів навколишнього середовища зображена на рисунку 3.2.

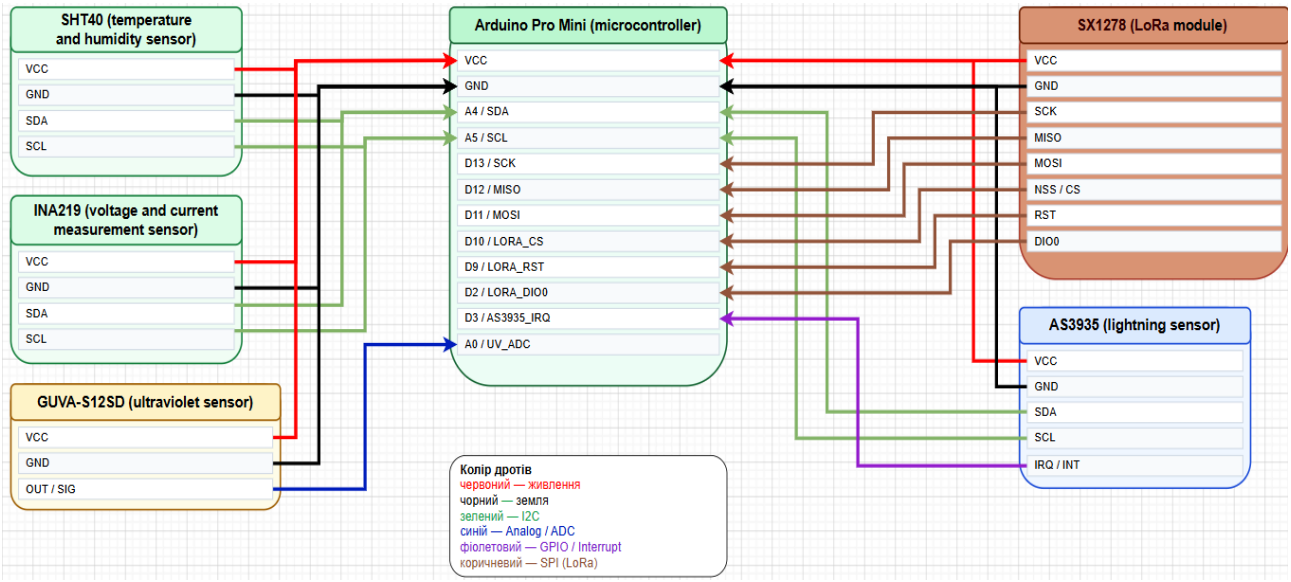


Рисунок 3.2 – Схема підключення компонентів зовнішнього блока системи

У зовнішньому блоці автоматизованої системи контролю параметрів навколишнього середовища центральним керуючим елементом є мікроконтролер Arduino Pro Mini 3,3 В. Його використання обумовлене низьким енергоспоживанням, компактними розмірами та достатньою кількістю інтерфейсів для підключення датчиків і радіомодуля. Оскільки зовнішній блок працює автономно, важливою вимогою до схеми є зменшення споживання енергії та забезпечення стабільної роботи від акумуляторного живлення.

Усі компоненти зовнішнього блока мають спільні лінії живлення VCC, а їхні виводи GND об’єднані в одну спільну землю, що забезпечує однаковий електричний потенціал для всіх елементів схеми. Такий підхід є обов’язковим, оскільки без спільної землі мікроконтролер не зможе коректно зчитувати сигнали з датчиків і обмінюватися даними з периферійними пристроями.

Датчик SHT40, який використовується для вимірювання температури та відносної вологості повітря, підключений до Arduino Pro Mini через інтерфейс I²C. Його вивід SDA підключений до входу A4 мікроконтролера, а вивід SCL – до входу A5. Через ці дві лінії Arduino отримує цифрові дані про температуру та вологість зовнішнього середовища.

Аналогічно до цієї ж шини I²C підключено датчик INA219, призначений для вимірювання напруги та струму в системі живлення. Його виводи SDA та

SCL також підключені відповідно до A4 та A5 Arduino Pro Mini. Використання спільної шини I²C дозволяє декільком цифровим пристроям одночасно працювати на одних і тих самих лініях зв’язку, оскільки кожен пристрій має власну адресу.

Датчик GUVA-S12SD використовується для визначення УФ-індексу. На відміну від SHT40 та INA219, цей модуль передає не цифрові дані, а аналоговий сигнал. Його вивід OUT/SIG підключений до аналогового входу A0/UV_ADC Arduino Pro Mini. Мікроконтролер зчитує напругу на цьому вході за допомогою вбудованого аналого-цифрового перетворювача, після чого значення використовується для розрахунку УФ-індексу. Виводи VCC та GND датчика підключені відповідно до ліній живлення та землі.

Для бездротової передачі даних від зовнішнього блока до внутрішнього використовується радіомодуль SX1278, який працює за технологією LoRa. Він підключений до Arduino Pro Mini через інтерфейс SPI. Лінія SCK модуля з’єднана з виводом D13 мікроконтролера, MISO – з D12, а MOSI – з D11. Ці три сигнальні лінії забезпечують обмін даними між Arduino та LoRa-модулем. Окремо використовується лінія вибору пристрою NSS/CS, яка підключена до виводу D10. За допомогою цього сигналу мікроконтролер активує саме радіомодуль під час обміну даними по SPI. Вивід RST модуля SX1278 підключений до D9 і використовується для апаратного скидання радіомодуля. Вивід DIO0 підключений до D2 Arduino Pro Mini та застосовується для обробки подій модуля LoRa, зокрема завершення передавання або приймання пакета.

Датчик AS3935 використовується для виявлення грозової активності та підключений до Arduino Pro Mini двома способами. Для обміну даними з датчиком застосовується інтерфейс I²C, тому його виводи SDA та SCL підключені до спільних ліній A4 та A5 мікроконтролера. Додатково вивід IRQ/INT датчика з’єднаний з цифровим входом D3. Ця лінія використовується як сигнал переривання: коли датчик виявляє блискавку або іншу важливу подію, він формує сигнал на виводі IRQ, а мікроконтролер може одразу обробити цю подію без постійного опитування датчика.

Таким чином, у схемі використано кілька типів з’єднань: спільні лінії VCC та GND забезпечують живлення всіх модулів, інтерфейс I²C використовується для цифрових датчиків SHT40, INA219 та AS3935, інтерфейс SPI застосовується для обміну даними з радіомодулем SX1278, аналоговий вхід A0 використовується для зчитування сигналу з датчика УФ-випромінювання GUVA-S12SD, а окремі цифрові входи D2 та D3 призначені для обробки службових сигналів від LoRa-модуля та датчика блискавок.

Розроблена схема підключення дозволяє зовнішньому блоку вимірювати параметри навколишнього середовища, контролювати стан живлення, виявляти грозову активність і передавати отримані дані до внутрішнього блока системи за допомогою радіоканалу LoRa. Внутрішній блок, у свою чергу, приймає ці дані, об’єднує їх із показниками внутрішніх датчиків, виконує обробку та відображає результати на дисплеї. Така побудова забезпечує розділення функцій між блоками, зручність розміщення сенсорів та можливість подальшого розширення системи.

3.3 Розробка та 3D-моделювання корпусів внутрішнього і зовнішнього блоків

Окрім розробки електронної схеми та програмної частини, важливим етапом реалізації автоматизованої системи контролю параметрів навколишнього середовища є створення корпусів для внутрішнього та зовнішнього блоків. Корпус забезпечує механічний захист електронних компонентів, зручність їх розміщення, правильне положення датчиків, доступ до елементів керування та можливість подальшого використання системи в реальних умовах.

Для розробки корпусів було використано середовище Autodesk Fusion 360. Це програмне забезпечення дозволяє створювати тривимірні моделі деталей, враховувати габаритні розміри електронних компонентів, передбачати монтажні отвори, вентиляційні прорізи, посадкові місця для дисплея, датчиків,

мікроконтролерів, модуля зв’язку та інших елементів системи. Використання 3D-моделювання дало змогу ще до виготовлення корпусів оцінити загальну конструкцію, перевірити зручність розміщення основних вузлів та зменшити ймовірність помилок під час складання макета.

Під час моделювання враховувалося функціональне призначення кожного блока. Внутрішній блок призначений для встановлення безпосередньо у виробничому приміщенні. Він виконує функції збирання, обробки та відображення інформації про параметри навколишнього середовища. Тому під час розробки його корпусу основну увагу було приділено зручності розміщення дисплея, мікроконтролера, датчиків, модуля бездротового зв’язку та керуючого елемента.

Конструкція корпусу внутрішнього блока виконана у прямокутній формі. Така форма є зручною для розміщення електронних компонентів усередині корпусу та спрощує компонування елементів. Прямокутна форма також забезпечує достатній внутрішній простір для встановлення мікроконтролера, дисплея, датчиків, модуля LoRa, з’єднувальних провідників та інших елементів системи.

На передній панелі внутрішнього блока передбачено місце для встановлення дисплея, який використовується для відображення поточних значень контрольованих параметрів навколишнього середовища. Також у корпусі передбачено окремий отвір для встановлення енкодера, який використовується як основний орган керування системою. Таке рішення дозволяє зменшити кількість елементів керування на передній панелі та спростити загальну конструкцію пристрою.

Важливою особливістю корпусу внутрішнього блока є наявність великої кількості вентиляційних отворів, виконаних у вигляді комірчастої структури. Такі отвори розміщені на стінках і верхній частині корпусу та забезпечують вільний доступ повітря до внутрішнього простору. Це необхідно для коректного вимірювання температури, вологості та інших параметрів мікроклімату, оскільки датчики не повинні бути повністю ізольовані від повітря

приміщення. Крім того, вентиляційні отвори сприяють природному охолодженню електронних компонентів, що підвищує стабільність роботи системи.

У корпусі також передбачено конструктивні елементи для кріплення та складання окремих частин. Наявність монтажних отворів дозволяє фіксувати кришку або панелі корпусу за допомогою гвинтів, що спрощує обслуговування пристрою. У разі необхідності користувач або розробник може отримати доступ до внутрішніх компонентів для перевірки з’єднань, заміни елементів або внесення змін у конструкцію.

Загальний вигляд 3D-моделі корпусу внутрішнього блока системи у середовищі Fusion 360 наведено на рисунку 3.3.

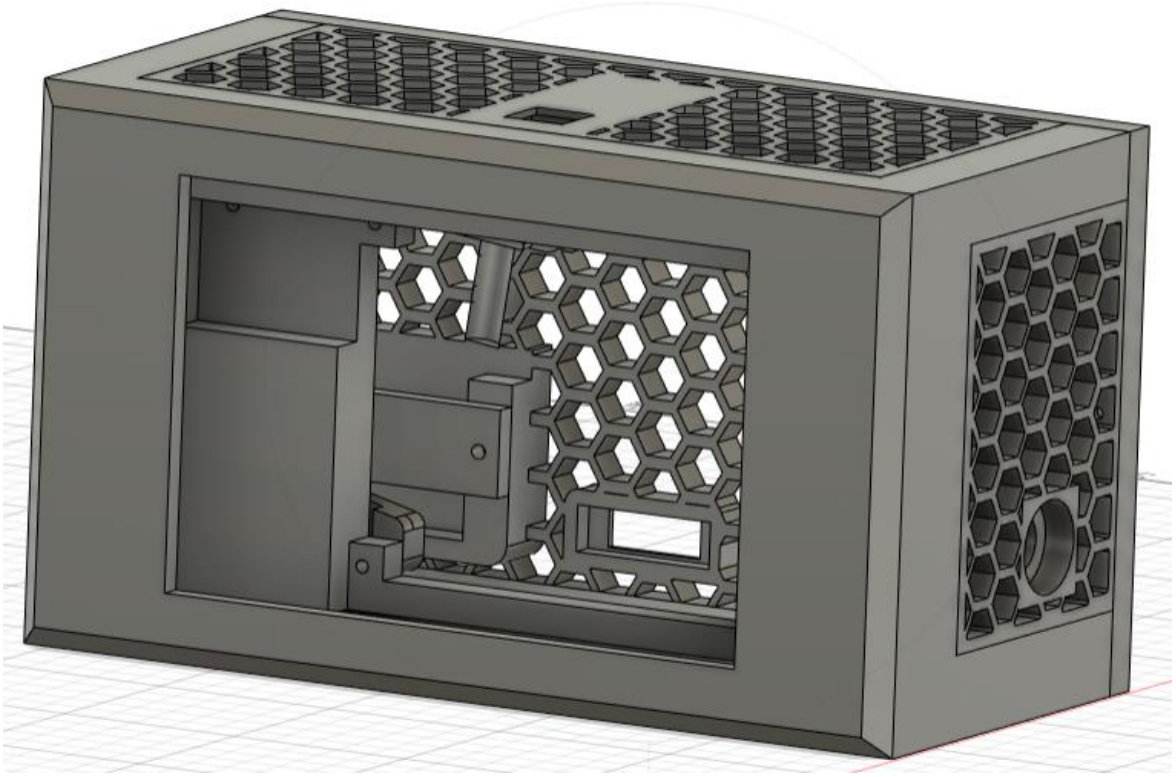


Рисунок 3.3 – Загальний вигляд 3D-моделі корпусу внутрішнього блока системи у середовищі Fusion 360

3D-модель кріплення для основної плати мікроконтролера, датчика реального часу DS3231 та датчика концентрації CO_2 MH-Z19D наведено на рисунку 3.4.

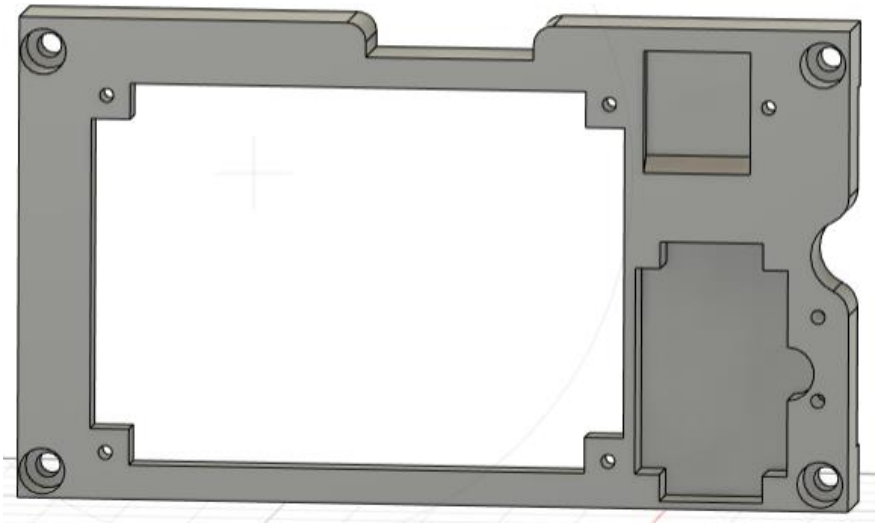


Рисунок 3.4 – 3D-модель кріплення для основної плати мікроконтролера, датчика реального часу DS3231 та датчика концентрації CO_2 MH-Z19D

На кріпленні з рисунку 3.4 наскрізний отвір призначений для основної плати мікроконтролера ESP32, справа зверху кріпиться датчик реального часу DS3231, а зліва зверху – датчик концентрації вуглекислого газу MH-Z19D.

Зовнішній блок системи призначений для розміщення за межами виробничого приміщення для контролю зовнішніх параметрів навколишнього середовища. На відміну від внутрішнього блока, його конструкція повинна враховувати можливий вплив зовнішніх факторів, зокрема пилу, вологи, сонячного випромінювання, перепадів температури та механічних навантажень. Тому під час розробки корпусу зовнішнього блока було враховано необхідність захисту електронних компонентів та одночасного забезпечення доступу повітря до вимірювальних елементів.

Конструкція зовнішнього блока складається з основного корпусу, захисних і монтажних елементів, а також додаткових деталей, призначених для встановлення або винесення окремих сенсорів. Основний корпус використовується для розміщення електронних компонентів, зокрема мікроконтролера, модуля бездротового зв’язку, елементів живлення та з’єднувальних провідників.

Окремі зовнішні елементи конструкції дозволяють розміщувати датчики таким чином, щоб вони отримували достовірні значення параметрів

середовища та не перебували під прямим впливом нагрівання електронних компонентів. Зокрема, для датчика температури та вологості передбачено розміщення в радіаційному екрані, який зменшує вплив прямих сонячних променів, пилу, опадів і перегріву корпуса на результати вимірювання. Водночас залишається можливість контакту з навколишнім повітрям. Наявність такого екрану особливо важлива для коректної роботи датчика SHT40, оскільки його показники можуть спотворюватися під дією сонячного випромінювання або недостатньої вентиляції.

Датчик УФ-випромінювання GUVA-S12SD розміщується між двома сонячними батареями, щоб мати доступ до зовнішнього освітлення, а датчик грози AS3935 – у зоні, де його робота не буде ускладнена розміщенням інших електронних елементів. Таке конструктивне рішення дає змогу відокремити чутливі елементи від основного корпусу та зменшити вплив нагрівання електронних компонентів на результати вимірювання. Крім того, винесення окремих датчиків може бути корисним для точнішого контролю параметрів навколишнього середовища.

Окрему увагу під час 3D-моделювання було приділено можливості монтажу зовнішнього блока. У конструкції передбачені площини, отвори та кронштейни, які можуть використовуватися для закріплення блока на поверхні або опорній конструкції. Це дозволяє встановлювати ЗБ у зручному місці, забезпечуючи правильне положення датчиків та стабільність роботи системи.

Також під час розробки враховувалося розміщення модуля бездротового зв’язку та його антени. Для стабільного обміну даними між зовнішнім і внутрішнім блоками важливо, щоб конструкція корпуса не створювала значних перешкод для проходження радіосигналу. Тому під час компонування зовнішнього блока було передбачено таке розміщення антени, яке забезпечуватиме надійний зв’язок між окремими частинами системи.

Загальний вигляд 3D-моделі зовнішнього блока системи у середовищі Fusion 360 наведено на рисунку 3.5.

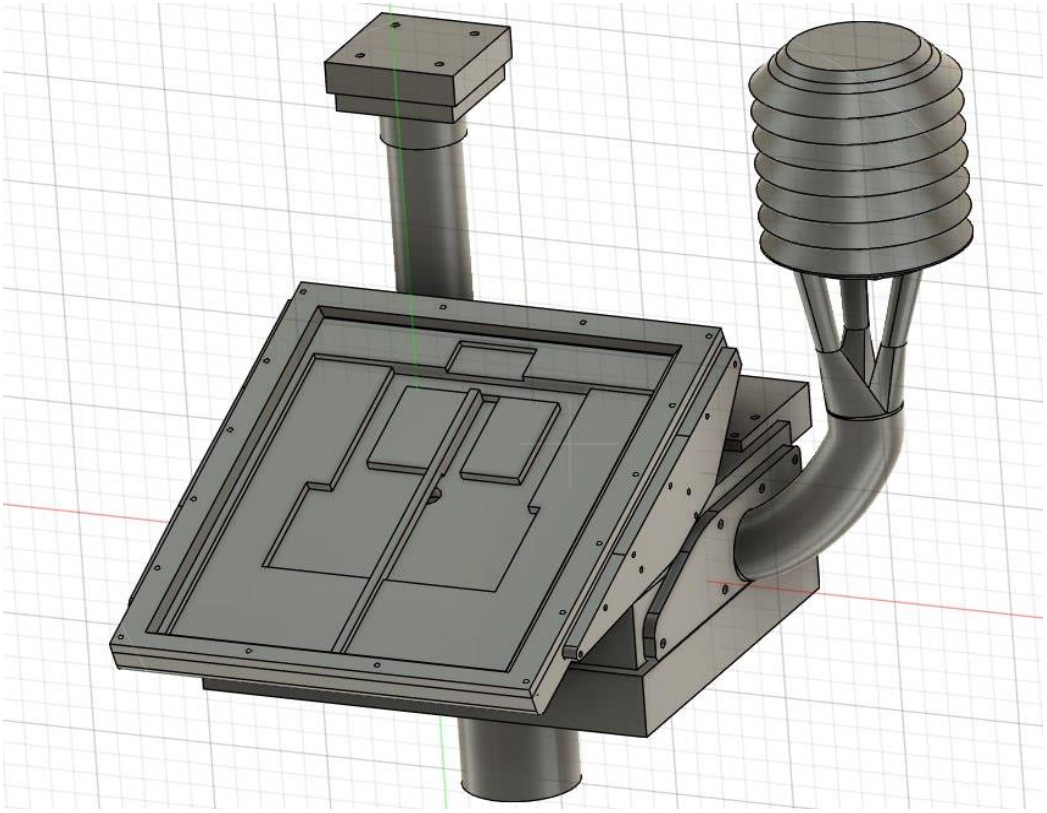


Рисунок 3.5 – Загальний вигляд 3D-моделі зовнішнього блока системи

Зовнішній вигляд кріплення для датчика грозової активності AS3935 наведено на рисунку 3.6.

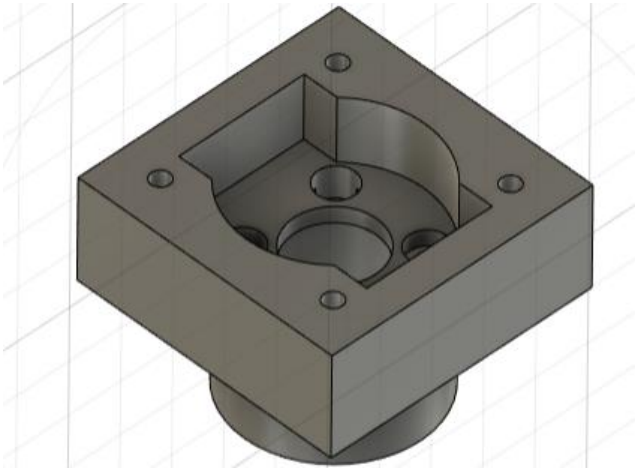


Рисунок 3.6 – Зовнішній вигляд кріплення для датчика грозової активності AS3935

Зовнішній вигляд радіаційного екрана для датчика температури та вологості SHT40 наведено на рисунку 3.7.



Рисунок 3.7 – Зовнішній вигляд радіаційного екрана для датчика температури та вологості SHT40

Зовнішній вигляд кріплення для сонячних панелей та датчика УФ-випромінювання GUVA-S12SD наведено на рисунку 3.8.

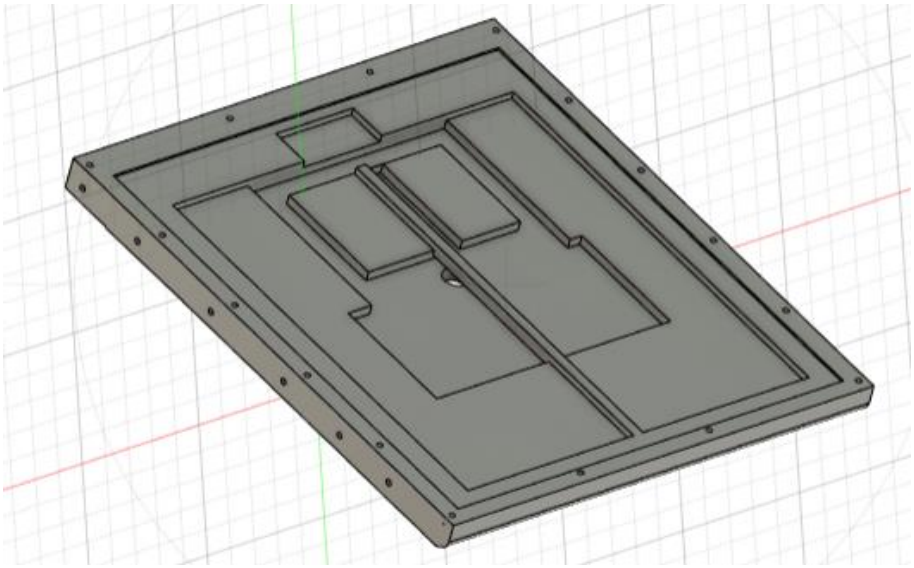


Рисунок 3.8 – Зовнішній вигляд кріплення для сонячних панелей та датчика УФ-випромінювання GUVA-S12SD

Зовнішній вигляд кріплення для основної плати мікроконтролера Arduino Pro Mini, тримача для літій-іонного акумулятора та модуля сонячної зарядки CN3065 наведено на рисунку 3.9.

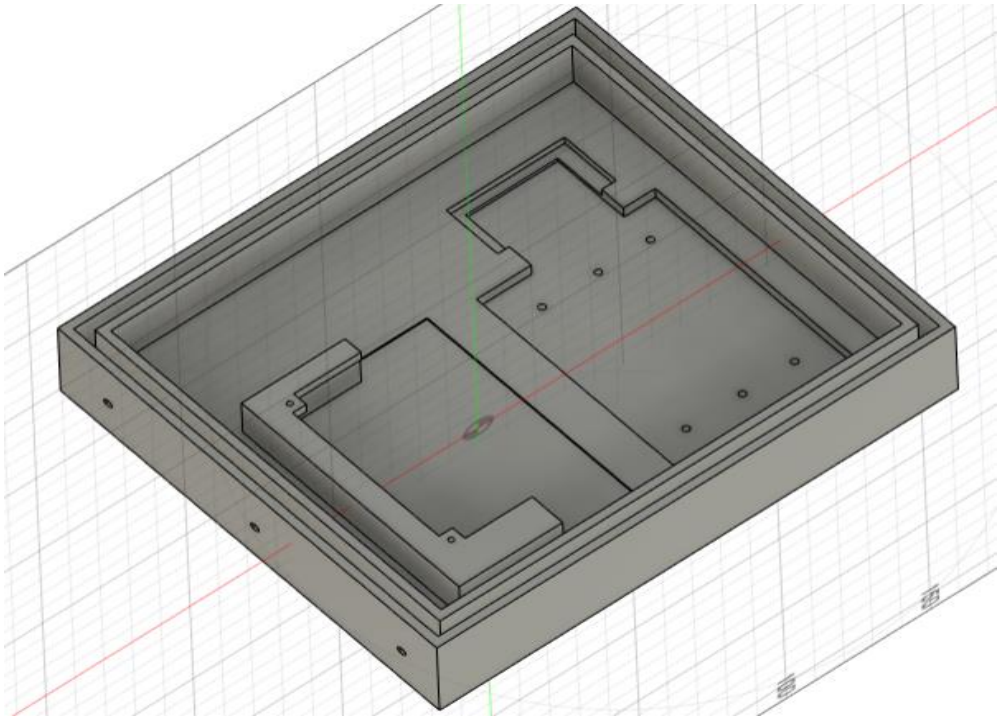


Рисунок 3.9 – Зовнішній вигляд кріплення для основної плати мікроконтролера Arduino Pro Mini, тримача для літій-іонного акумулятора та модуля сонячної зарядки CN3065

На рисунку 3.9 зліва знизу знаходиться місце для основної плати мікроконтролера Arduino Pro Mini, де знаходяться конектори, датчик вимірювання напруги та струму INA219, стабілізатор напруги MCP1700 та радіомодуль SX1278. З правого боку зверху знаходиться місце для модуля сонячної зарядки CN3065, а знизу – місце для тримача для літій-іонного акумулятора.

Розробка корпусів у середовищі Fusion 360 дозволила сформувати конструктивну основу для подальшого виготовлення макета автоматизованої системи. Завдяки тривимірному моделюванню було визначено раціональне розміщення основних компонентів, передбачено місця для кріплення, встановлення дисплея, енкодера, датчиків, вентиляційних отворів, модуля зв’язку та елементів живлення.

Таким чином, розробка та 3D-моделювання корпусів внутрішнього і зовнішнього блоків є важливою частиною практичної реалізації автоматизованої системи контролю параметрів навколишнього середовища.

Створені моделі дозволяють перейти від електронного макета до більш завершеного пристрою, який може бути зручно встановлений, протестований та використаний у реальних умовах виробничого приміщення.

3.4 Розробка користувацького інтерфейсу системи

Одним із важливих етапів реалізації автоматизованої системи контролю параметрів навколишнього середовища у виробничих приміщеннях є розробка користувацького інтерфейсу. Його призначення полягає у візуалізації поточних значень контрольованих параметрів, поданні службової інформації про стан пристрою та забезпеченні зручної взаємодії користувача із системою.

Інтерфейс реалізовано у внутрішньому блоці системи, який виконує обробку даних, отриманих від датчиків внутрішнього середовища та зовнішнього модуля. На основі цих даних система формує інформаційні сторінки, що відображаються на дисплеї та дозволяють користувачу оперативно оцінити стан середовища.

Основною вимогою до інтерфейсу є зрозуміле та логічне подання інформації. Оскільки система працює з різними типами даних, інформацію в інтерфейсі поділено на три групи: параметри внутрішнього середовища, параметри зовнішнього середовища та службові дані про стан системи.

Для зручності сприйняття інформації інтерфейс системи поділений на декілька сторінок. На кожній сторінці передбачено верхню службову панель, на якій подано поточний час, дату, індикатор рівня сигналу та стан живлення. Також у верхній частині екрана кожної сторінки розміщено навігаційний блок, який показує поточну сторінку інтерфейсу. Завдяки цьому користувач може швидко зорієнтуватися у структурі меню та оцінити загальний стан системи без переходу до інших розділів.

Керування користувацьким інтерфейсом здійснюється за допомогою енкодера, який виконує функції навігації та підтвердження вибору. Обертання енкодера використовується для перемикання між сторінками інтерфейсу або

пунктами меню, а натискання – для вибору потрібного режиму чи підтвердження дії. Такий спосіб керування дозволяє реалізувати зручну навігацію без використання великої кількості окремих кнопок, що є доцільним для компактного автономного пристрою.

На рисунку 3.10 показано розроблений дизайн першої сторінки «Home», виконаний в Figma.

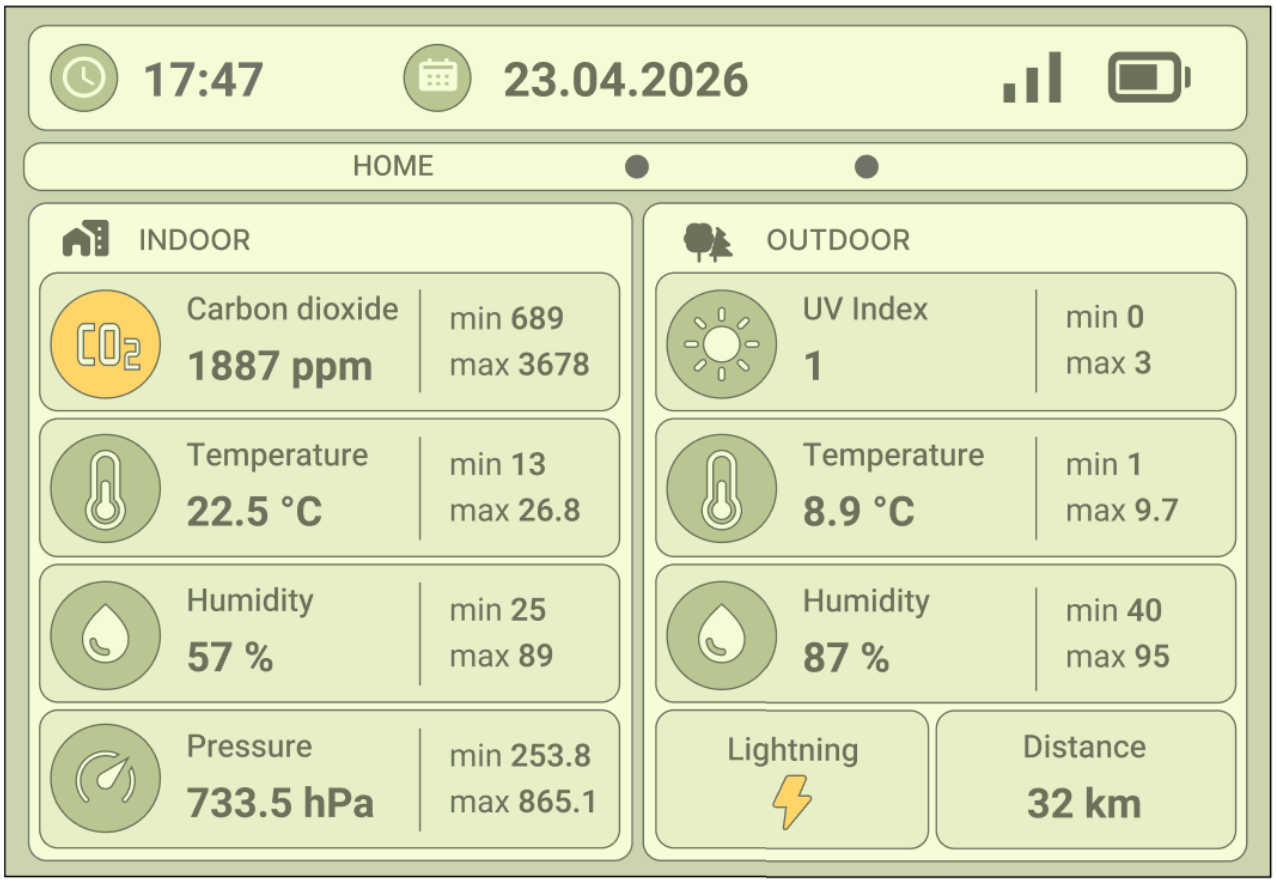


Рисунок 3.10 – Розроблений дизайн першої сторінки «Home»

Перша сторінка користувацького інтерфейсу виконує функцію головної інформаційної панелі. На ній подано основні параметри приміщення та зовнішнього середовища, розміщені у блоках «Indoor» та «Outdoor» відповідно. Таке компонування дозволяє одразу після увімкнення пристрою переглянути найважливіші показники та порівняти умови всередині приміщення із зовнішніми факторами.

У блоці «Indoor» відображаються параметри внутрішнього середовища: концентрація вуглекислого газу, температура, відносна вологість та атмосферний тиск. Для кожного показника виводиться поточне значення, а також мінімальне та максимальне значення, зафіксоване системою. Це дозволяє не лише бачити поточний стан середовища, а й оцінювати зміну параметрів протягом певного часу.

Під час розробки інтерфейсу важливо враховувати не лише відображення числових значень, а й інформування користувача про небезпечні або небажані стани. Для інформування користувача про зміну якості повітря в інтерфейсі передбачено градієнтне змінення кольору елементів відображення залежно від концентрації CO_2. За нормального рівня концентрації CO_2, близько 400 ppm, використовується стандартний м’ятний колір, який відповідає безпечному та комфортному стану повітря. При підвищенні концентрації CO_2 колір поступово переходить у жовті відтінки, що вказує на погіршення якості повітря. При значенні близько 1200 ppm використовується блідо-жовтий відтінок, а при досягненні приблизно 1400 ppm колір стає жовтим – це свідчить про необхідність звернути увагу на стан повітря у приміщенні. У разі значного перевищення концентрації CO_2, зокрема при значенні 2000 ppm і вище, інтерфейс змінює колір на червоний, що може сигналізувати про критичне погіршення якості повітря та необхідність вжиття заходів для покращення вентиляції приміщення. Така індикація дозволяє швидко визначити рівень небезпеки без детального аналізу числового значення.

У блоці «Outdoor» розміщено параметри зовнішнього середовища: УФ-індекс, зовнішню температуру, відносну вологість, наявність грозової активності та відстань до блискавки. Ці дані дають змогу враховувати зовнішні умови, які можуть впливати на безпеку експлуатації системи та загальний стан виробничого середовища.

Для відображення грозової активності в інтерфейсі передбачено поле «Lightning», у якому знаходиться графічний індикатор блискавки та відстань до зафіксованої грозової активності. Колір індикатора змінюється залежно від

наявності події: за відсутності грози використовується м’ятний колір, а при її виявленні – жовтий. Це дозволяє користувачу швидко визначити наявність грозової активності без детального аналізу числового значення відстані.

Отже, сторінка «Home» поєднує основні показники внутрішнього та зовнішнього середовища, а також використовує кольорову індикацію для швидкого сприйняття потенційно небажаних станів. Завдяки цьому вона є основною сторінкою для оперативного контролю умов у виробничому приміщенні.

На рисунку 3.11 показано розроблений дизайн другої сторінки «Outdoor», виконаний в Figma.

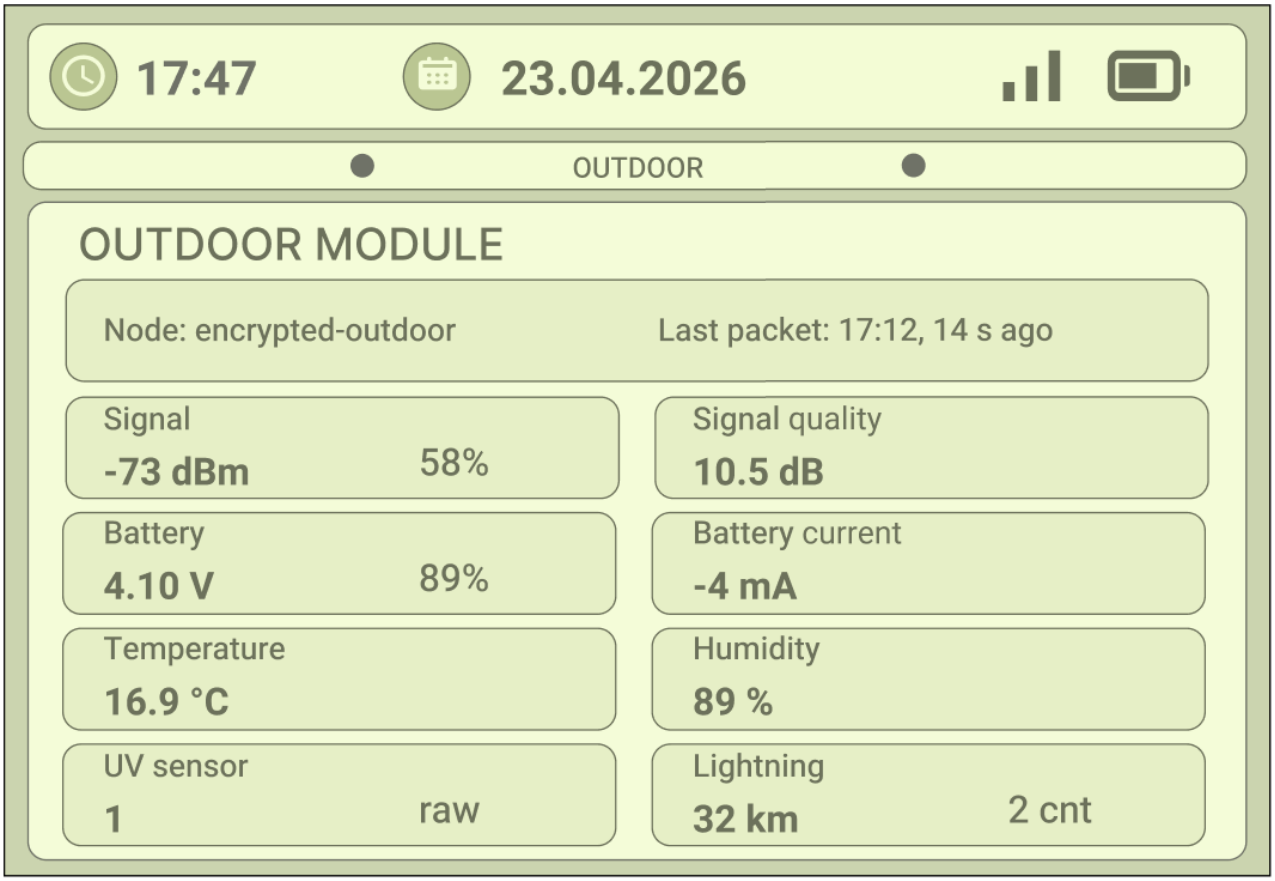


Рисунок 3.11 – Розроблений дизайн другої сторінки «Outdoor»

Друга сторінка користувацького інтерфейсу має назву «Outdoor» та призначена для перегляду розширеної інформації про роботу зовнішнього блока системи. Вона містить як вимірювані параметри зовнішнього

середовища, так і службові дані, необхідні для перевірки стабільності бездротового зв’язку та автономного живлення.

У верхній частині сторінки відображається назва зовнішнього вузла системи, а також інформація про час отримання останнього пакета даних. Це дозволяє визначити, чи надходять дані від зовнішнього блока своєчасно та чи не було втрачено зв’язок між блоками.

Окремо на сторінці наведено параметри радіоканалу: рівень сигналу та якість сигналу. Рівень сигналу вказується у dBm, а якість сигналу – у dB. Ці значення є корисними під час тестування системи, оскільки дозволяють оцінити стабільність передавання даних через LoRa.

Також на сторінці відображаються параметри автономного живлення зовнішнього блока: напруга акумулятора, рівень заряду у відсотках та струм батареї. Контроль цих показників дозволяє своєчасно виявити зниження заряду та оцінити енергетичний стан пристрою.

Нижня частина сторінки містить вимірювані показники зовнішнього середовища: температуру, відносну вологість, УФ-індекс, відстань до зафіксованої грозової активності та кількість виявлених блискавок. Таке подання інформації дає змогу користувачу перевірити роботу сенсорів зовнішнього блока та детальніше проаналізувати умови поза приміщенням.

Таким чином, сторінка «Outdoor» є корисною під час тестування системи, діагностики помилок та контролю стабільності роботи бездротового каналу. Винесення службової інформації на окрему сторінку дозволяє не перевантажити головний екран надмірною кількістю технічних даних і водночас забезпечити доступ до них у разі потреби.

На рисунку 3.12 показано розроблений дизайн третьої сторінки «Settings», виконаний в Figma.

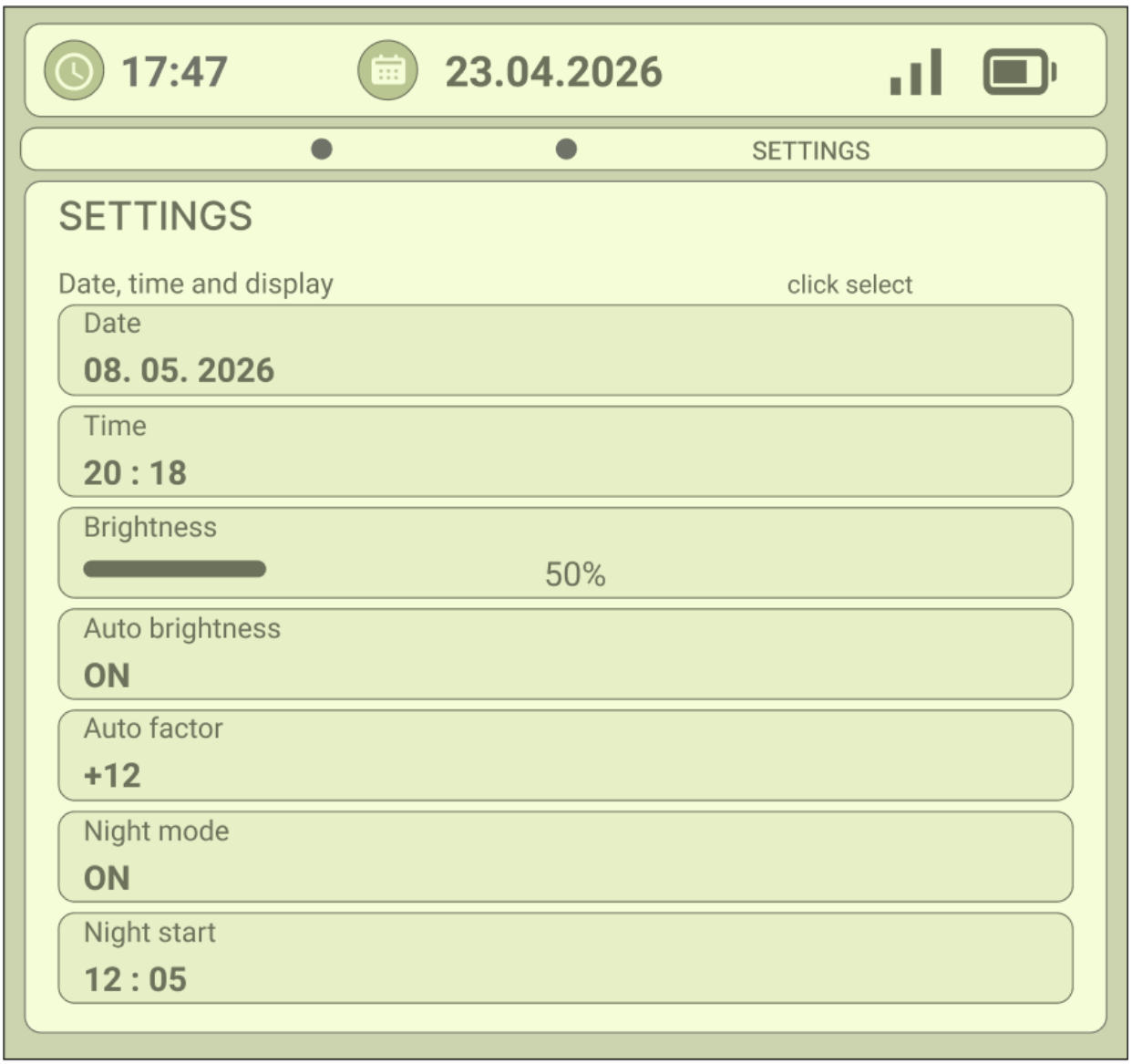


Рисунок 3.12 – Розроблений дизайн третьої сторінки «Settings»

Третя сторінка користувацького інтерфейсу має назву «Settings» та призначена для налаштування параметрів роботи системи. На цій сторінці користувач може переглядати та змінювати основні параметри відображення інформації, зокрема дату, час, яскравість дисплея, режим автоматичного регулювання яскравості та нічний режим.

Основна частина сторінки містить перелік налаштувань. Поля «Date» та «Time» використовуються для відображення або коригування поточної дати й часу. Параметр «Brightness» відповідає за рівень яскравості дисплея та поданий у вигляді шкали зі значенням у відсотках, що дає змогу адаптувати екран до умов освітлення у приміщенні.

Параметр «Auto brightness» відповідає за ввімкнення або вимкнення автоматичного регулювання яскравості. У разі активації цього режиму система може змінювати яскравість дисплея залежно від рівня зовнішнього освітлення. Пункт «Auto factor» використовується для налаштування коефіцієнта автоматичного регулювання, тобто чутливості системи до зміни освітленості.

Окремо на сторінці передбачено налаштування нічного режиму. Параметр «Night mode» вказує, чи активовано нічний режим, а пункт «Night start» визначає час його автоматичного запуску. Нічний режим може використовуватися для зменшення яскравості дисплея у темний час доби, що підвищує зручність користування пристроєм і знижує енергоспоживання.

Для підвищення зручності користування інтерфейсом усі вимірювані параметри відображаються разом із відповідними одиницями вимірювання. Температура відображається у градусах Цельсія, відносна вологість – у відсотках, концентрація CO_2 – у ppm, атмосферний тиск – у hPa, рівень радіосигналу – у dBm, напруга акумулятора – у вольтах , а відстань до грозової активності – у кілометрах. Наявність одиниць вимірювання біля кожного параметра дозволяє уникнути неправильного трактування даних користувачем та робить інтерфейс більш зрозумілим.

Програмна реалізація інтерфейсу передбачає періодичне оновлення даних на дисплеї. Мікроконтролер отримує значення з датчиків, виконує їх обробку та оновлює відповідну інформацію на екрані. Дані, отримані із зовнішнього блока через LoRa, виводяться на дисплей після успішного приймання пакета. Завдяки цьому користувач бачить актуальні значення параметрів внутрішнього та зовнішнього середовища.

Щоб уникнути мерехтіння екрана та зайвого навантаження на мікроконтролер, оновлення інтерфейсу виконується з певним інтервалом. Такий підхід забезпечує стабільну роботу системи та робить відображення інформації більш комфортним для користувача. Частота оновлення повинна бути достатньою для оперативного контролю параметрів, але не надмірною, оскільки більшість параметрів мікроклімату змінюються поступово.

Розроблений інтерфейс виконує не лише інформаційну, а й діагностичну функцію. Завдяки відображенню службових параметрів користувач може оцінити стан зовнішнього блока, стабільність радіозв’язку, рівень заряду акумулятора та коректність надходження даних від датчиків. Це підвищує надійність експлуатації системи та спрощує пошук можливих несправностей.

Таким чином, користувацький інтерфейс є важливою складовою автоматизованої системи контролю параметрів навколишнього середовища. Він забезпечує зручне подання основних і службових даних, підтримує навігацію між сторінками, за допомогою кольорової індикації попереджує про небезпечні відхилення значення CO_2 та повідомляє про наявність грозової активності. Реалізація інтерфейсу на базі внутрішнього блока дозволяє оперативно отримувати інформацію про стан виробничого приміщення, зовнішні умови та працездатність системи загалом.

3.5 Аналіз отриманих результатів та оцінка точності вимірювань

Після розробки апаратної частини та користувацького інтерфейсу було проведено перевірку працездатності автоматизованої системи контролю параметрів навколишнього середовища у виробничих приміщеннях. Метою тестування було підтвердження коректності роботи основних вузлів системи, перевірка стабільності зчитування даних із датчиків, оцінка правильності передавання інформації між внутрішнім і зовнішнім блоками, а також аналіз точності вимірювання контрольованих параметрів.

На першому етапі тестування було перевірено працездатність внутрішнього блока системи. Основна увага приділялася коректному запуску мікроконтролера ESP32, ініціалізації підключених датчиків, роботі дисплея та відображенню інформації у користувацькому інтерфейсі. Після подачі живлення система виконувала початкову ініціалізацію, перевіряла наявність підключених модулів і переходила до режиму зчитування даних.

Під час перевірки внутрішнього блока було встановлено, що система коректно зчитує показники температури, відносної вологості, атмосферного тиску, концентрації вуглекислого газу та рівня освітленості. Отримані значення виводяться на дисплей у зручному для користувача вигляді із зазначенням відповідних одиниць вимірювання. Це дозволяє оперативно оцінити стан мікроклімату у виробничому приміщенні без використання додаткового обладнання.

На другому етапі було виконано перевірку коректності відображення даних у користувацькому інтерфейсі. Було перевірено, чи правильно оновлюються значення параметрів, чи відображаються одиниці вимірювання. Також було перевірено відображення службової інформації, зокрема стану зв’язку, параметрів живлення зовнішнього блока та часу останнього оновлення даних.

Відображення поточних виміряних параметрів внутрішнього та зовнішнього блоків системи зображено на рисунку 3.13.



Рисунок 3.13 – Відображення поточних виміряних параметрів внутрішнього та зовнішнього блоків системи

Сторінка відображення параметрів зовнішнього блоку системи зображена на рисунку 3.14.



Рисунок 3.14 – Сторінка відображення параметрів зовнішнього блоку системи

Сторінка налаштувань інтерфейсу системи зображена на рисунку 3.15.

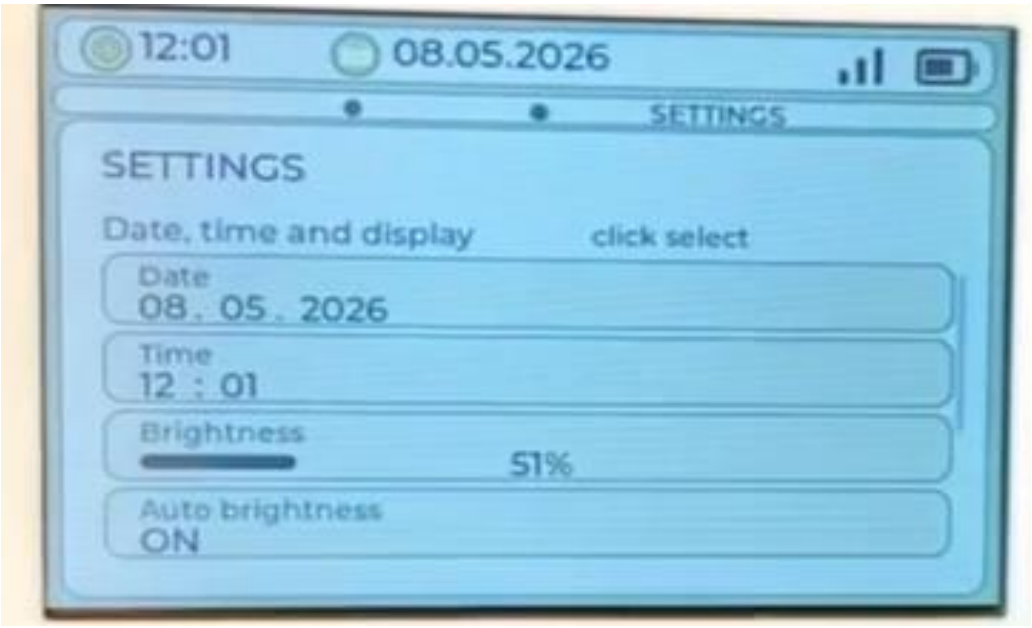


Рисунок 3.15 – Сторінка налаштувань інтерфейсу системи

Режим зміни дати на сторінці налаштувань інтерфейсу зображено на рисунку 3.16.

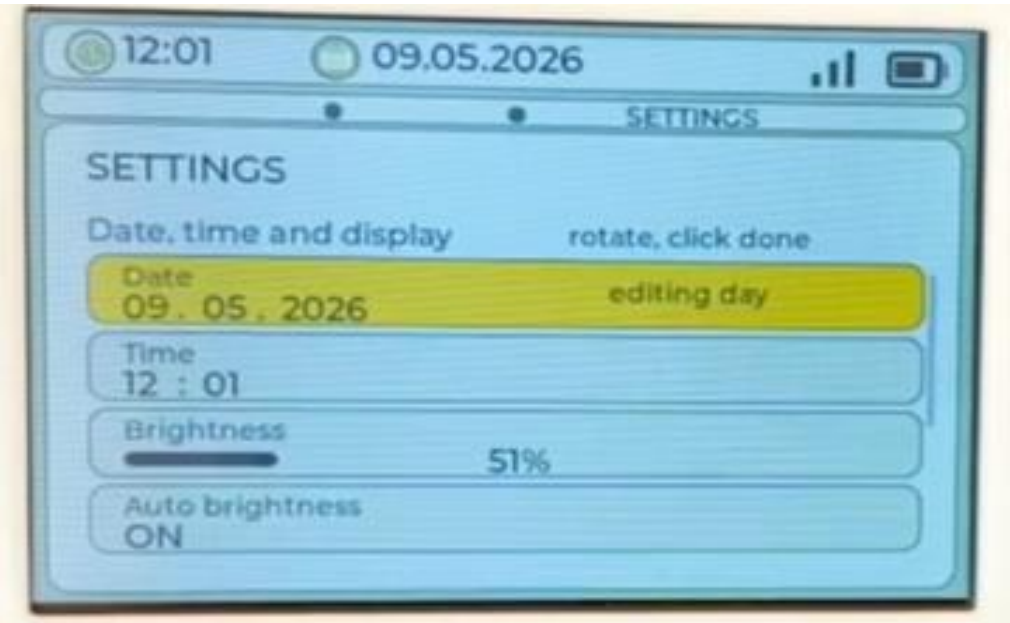


Рисунок 3.16 – Режим зміни дати на сторінці налаштувань інтерфейсу

Режим зміни часу на сторінці налаштувань інтерфейсу зображено на рисунку 3.17.



Рисунок 3.17 – Режим зміни часу на сторінці налаштувань інтерфейсу

Режим зміни яскравості дисплею на сторінці налаштувань інтерфейсу зображено на рисунку 3.18.

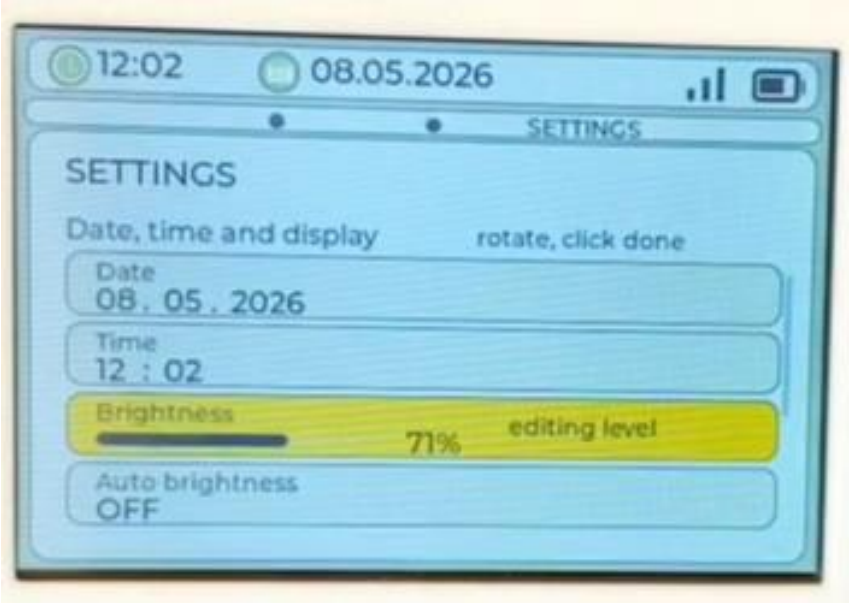


Рисунок 3.18 – Режим зміни яскравості дисплею на сторінці налаштувань інтерфейсу

Режим зміни автояскравості дисплею на сторінці налаштувань інтерфейсу зображено на рисунку 3.19.

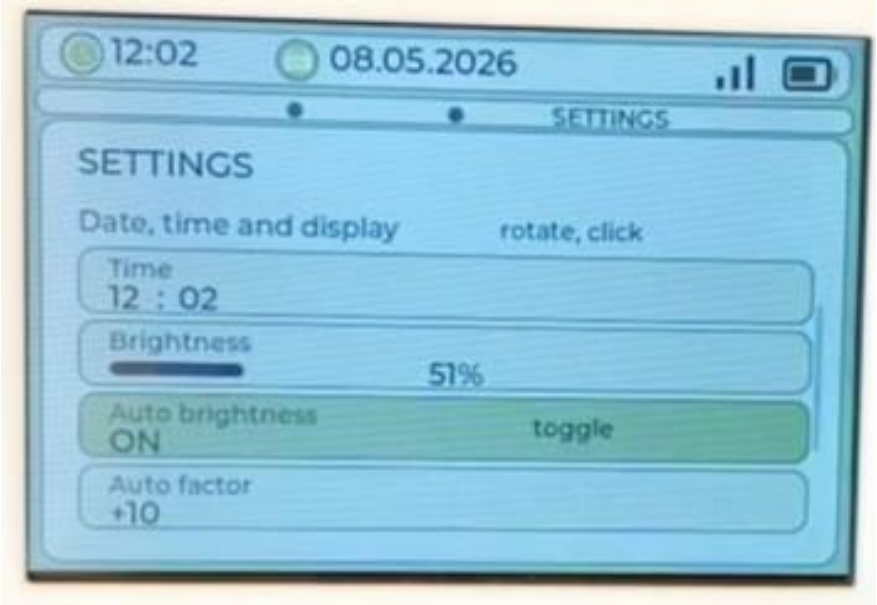


Рисунок 3.19 – Режим зміни автояскравості дисплею на сторінці налаштувань інтерфейсу

Режим зміни автофактора на сторінці налаштувань інтерфейсу зображено на рисунку 3.20.

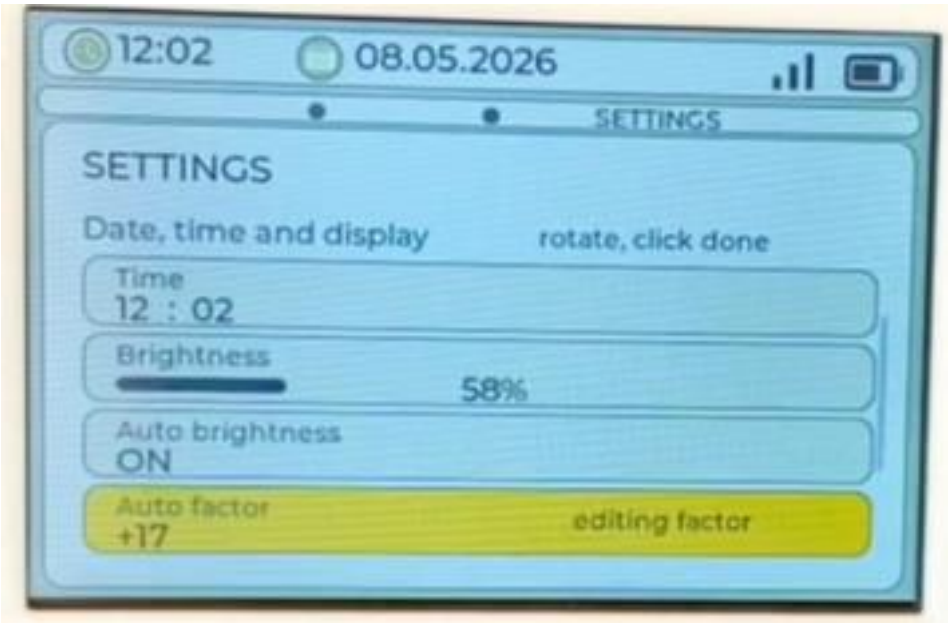


Рисунок 3.20 – Режим зміни автофактора на сторінці налаштувань інтерфейсу

Режим зміни нічного режиму на сторінці налаштувань інтерфейсу зображено на рисунку 3.21.



Рисунок 3.21 – Режим зміни нічного режиму на сторінці налаштувань інтерфейсу

Режим зміни часу початку нічного режиму на сторінці налаштувань інтерфейсу зображено на рисунку 3.22.

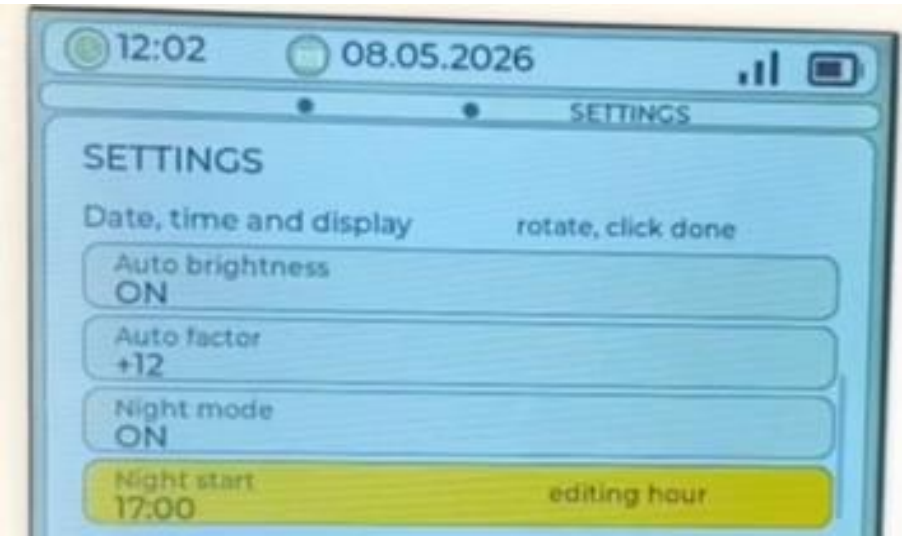


Рисунок 3.22 – Режим зміни часу початку нічного режиму на сторінці налаштувань інтерфейсу

На рисунку 3.22 зображено сторінку налаштувань інтерфейсу в режимі редагування часу початку нічного режиму. У верхній частині екрана відображається поточний час (12:02) та дата (08.05.2026). На сторінці налаштувань активовано автояскравість (Auto brightness: ON), встановлено коефіцієнт автояскравості (Auto factor: +12), увімкнено нічний режим (Night mode: ON). Виділений жовтим кольором рядок «Night start – 17:00» знаходиться в режимі редагування (editing hour), що дозволяє користувачу змінити годину початку нічного режиму шляхом обертання енкодера.

Основними параметрами, для яких доцільно виконувати оцінку точності, є температура, відносна вологість та атмосферний тиск. Для кожного з цих параметрів визначається різниця між значенням, отриманим системою, та контрольним значенням.

Абсолютна похибка вимірювання визначається як різниця між виміряним значенням і контрольним значенням:

$$\Delta = \left|X_{вим} - X_{контр}\right|. \quad (3.1)$$

де Δ – абсолютна похибка вимірювання;

$X_{вим}$ – значення, отримане розробленою системою;

$X_{контр}$ – контрольне або еталонне значення параметра.

Для більш зручного аналізу може також використовуватися відносна похибка, яка показує відхилення виміряного значення у відсотках від контрольного значення:

$$\delta = \frac{|X_{вим} - X_{контр}|}{X_{контр}} \times 100\ \%. \qquad (3.2)$$

де δ – відносна похибка вимірювання.

Оцінка точності вимірювань дозволяє визначити, наскільки отримані дані можуть бути використані для контролю стану виробничого середовища. Для системи контролю мікроклімату не завжди потрібна лабораторна точність, оскільки основним завданням є своєчасне виявлення небезпечних або небажаних відхилень параметрів. Водночас показники повинні бути достатньо точними для прийняття рішення про необхідність провітрювання, посилення вентиляції, зміни умов експлуатації або попередження користувача.

Під час тестування також було проаналізовано стабільність роботи системи у тривалому режимі. Для цього система залишалася увімкненою протягом певного часу, після чого оцінювалось, чи продовжують датчики передавати дані, чи оновлюється інформація на дисплеї, чи не втрачається зв’язок із зовнішнім блоком та чи не виникають помилки в роботі програмного забезпечення.

Для оцінки точності вимірювань було виконано порівняння отриманих показників з різними джерелами даних: врізним датчиком температури, настільним термометром-гігрометром HTC-1 та сайтом прогнозу погоди meteocast [77].

На рисунку 3.23 показано порівняння температури та вологості внутрішнього та зовнішнього блоків з настільним термометром-гігрометром HTC-1 та врізним датчиком температури.



Рисунок 3.23 – Порівняння значень температури та вологості, виміряними датчиками внутрішнього та зовнішнього блоків, зі значеннями з настільного термометра-гігрометра HTC-1 та врізного датчика температури

У таблиці 3.1 подано порівняння показників температури та вологості, отриманих системою, з даними контрольних вимірювальних приладів.

Таблиця 3.1 – Порівняння показників температури та вологості, отриманих системою, з даними контрольних вимірювальних приладів

Параметр	Врізний датчик температури	Термометр-гігрометр HTC-1	Внутрішній блок	Зовнішній блок
Температура	26,3 ℃	26 ℃	26,6 ℃	26,2 ℃
Відносна вологість	-	48 %	48 %	61 %

Для розрахунку відносної та абсолютної похибок температури зручно обрати за контрольне значення HTC-1, яке дорівнює $T_{контр} = 26$ ℃.

Врізний датчик температури:

$$\Delta T = |26{,}3 - 26| = 0{,}3\ ℃, \tag{3.3}$$

$$\delta = \frac{|26{,}3 - 26|}{26} \times\ 100\ \% = 1{,}15\ \%. \tag{3.4}$$

Внутрішній блок:

$$\Delta T = |26{,}6 - 26| = 0{,}6\ ℃, \tag{3.5}$$

$$\delta = \frac{|26{,}6 - 26|}{26} \times\ 100\ \% = 2{,}31\ \%. \tag{3.6}$$

Зовнішній блок:

$$\Delta T = |26{,}2 - 26| = 0{,}2\ ℃, \tag{3.7}$$

$$\delta = \frac{|26{,}2 - 26|}{26} \times\ 100\ \% = 0{,}77\ \%. \tag{3.8}$$

Для розрахунку відносної та абсолютної похибок вологості зручно обрати за контрольне значення НТС-1, яке дорівнює $\varphi_{контр} = 48\ \%$.

Внутрішній блок:

$$\Delta\varphi = |48 - 48| = 0\ \%, \tag{3.9}$$

$$\delta = \frac{|48 - 48|}{48} \times\ 100\ \% = 0\ \%. \tag{3.10}$$

Зовнішній блок:

$$\Delta\varphi = |61 - 48| = 13\ \%, \tag{3.11}$$

$$\delta = \frac{|61 - 48|}{48} \times\ 100\ \% = 27{,}08\ \%. \tag{3.12}$$

Отже, за результатами порівняння встановлено, що температурні показники, отримані датчиками системи, є близькими до значень контрольних вимірювальних приладів. Абсолютне відхилення температури становить від 0,2 °C до 0,6 °C, а відносне – від 0,77 % до 2,31 %, що свідчить про достатню узгодженість результатів вимірювання температури. Найбільше відхилення температури становить 0,6 °C, що є незначним і може бути пов’язане з похибкою датчиків, різним місцем їх розташування та часом стабілізації показників.

Показник відносної вологості внутрішнього блока збігається зі значенням настільного термометра-гігрометра НТС-1 і становить 48 %. Це підтверджує коректність вимірювання вологості внутрішнім блоком системи. Для зовнішнього блока було зафіксовано значення 61 %, тобто відхилення від контрольного показника становить 13 %. Така різниця є суттєвою, тому її не доцільно пояснювати лише паспортною похибкою датчика. Імовірною причиною розбіжності може бути те, що після переміщення пристрою датчик SHT40 зовнішнього блока не встиг стабілізуватися до умов приміщення. Отже, отриманий результат потребує додаткової перевірки шляхом повторного вимірювання після стабілізації показників.

Таким чином, результати вимірювань підтверджують працездатність системи контролю параметрів навколишнього середовища. Температурні показники мають незначні відхилення від контрольних значень, а вимірювання вологості внутрішнім блоком повністю відповідає показнику контрольного приладу. Отримані результати свідчать про коректну роботу основних вимірювальних елементів системи та можливість її подальшого використання для контролю параметрів мікроклімату.

На рисунку 3.24 показано порівняння значення атмосферного тиску, виміряного розробленою автоматизованою системою контролю параметрів навколишнього середовища, зі значенням атмосферного тиску з сайту прогнозу погоди meteocast.



Рисунок 3.24 – Порівняння значення атмосферного тиску, виміряного розробленою автоматизованою системою контролю параметрів навколишнього середовища, зі значенням атмосферного тиску з сайту прогнозу погоди meteocast

Для переведення атмосферного тиску з міліметрів ртутного стовпа у гектопаскалі використовується співвідношення:

$$1 \text{ мм рт. ст.} = 133{,}3 \text{ Па}. \tag{3.13}$$

Оскільки 1 гПа=100 Па, тоді формула переведення має вигляд:

$$P_{\text{гПа}} = \frac{P_{\text{мм рт.ст.}} \times 133{,}3}{100}, \tag{3.14}$$

$$P_{гПа} = \frac{753 \times 133{,}3}{100} = 1003{,}749 \text{ гПа} \approx 1003{,}75. \quad (3.15)$$

Порівняння розрахованого значення з показником, відображеним на дисплеї пристрою, показало незначну різницю. У результаті розрахунку було отримано значення атмосферного тиску 1003,75 гПа, тоді як на дисплеї системи відображається 1003,8 гПа.

Слід зазначити, що сайт прогнозу погоди meteocast відображає атмосферний тиск, приведений до рівня моря, тоді як датчик BME280 вимірює абсолютний тиск на висоті розміщення пристрою. Отже, порівняння є наближеним і використовується лише для загальної оцінки правильності роботи датчика.

Абсолютна похибка становить:

$$\Delta P = 1003{,}8 - 1003{,}75 = 0{,}05 \text{ гПа}. \quad (3.16)$$

Відносна похибка становить:

$$\delta = \frac{|1003{,}8 - 1003{,}75|}{1003{,}75 \times 100\ \%} = 0{,}00498\ \% \approx 0{,}005\ \%. \quad (3.17)$$

Абсолютне відхилення становить 0,05 гПа, а відносне відхилення – приблизно 0,005 %, що свідчить про дуже малу розбіжність між результатами. Незначна різниця пояснюється округленням значення на дисплеї до одного знака після коми. Це підтверджує правильність виконаного перерахунку атмосферного тиску та коректність роботи системи відображення даних.

Окремо було перевірено реакцію системи на зміну параметрів середовища. При зміні температури або вологості система повинна відображати нові значення на дисплеї.

Результати тестування показали, що розроблена система здатна виконувати основні функції контролю параметрів навколишнього середовища.

Внутрішній блок забезпечує збирання та відображення даних про стан мікроклімату у приміщенні, а зовнішній блок передає додаткову інформацію про умови поза приміщенням. Наявність користувацького інтерфейсу дозволяє оператору швидко оцінити поточний стан середовища та своєчасно звернути увагу на відхилення параметрів від допустимих меж.

Таким чином, проведений аналіз отриманих результатів підтвердив працездатність запропонованої автоматизованої системи контролю параметрів навколишнього середовища. Система забезпечує зчитування даних із датчиків, їх обробку, передавання між блоками, візуалізацію та формування попереджень. Оцінка точності вимірювань показує, що отримані дані можуть бути використані для контролю стану виробничого приміщення та підвищення рівня безпеки праці.

3.6 Оцінка впливу на умови праці та безпеку виробництва

Розроблена автоматизована система контролю параметрів навколишнього середовища у виробничих приміщеннях спрямована не лише на технічне вимірювання показників мікроклімату, а й на підвищення рівня безпеки праці. Її впровадження дозволяє своєчасно виявляти відхилення параметрів середовища від допустимих значень, попереджати працівників про потенційно небезпечні умови та забезпечувати більш ефективний контроль стану виробничого приміщення.

Умови праці у виробничому середовищі значною мірою залежать від температури повітря, відносної вологості, концентрації вуглекислого газу, рівня освітленості, ефективності вентиляції та загального стану повітряного середовища. Відхилення цих параметрів від нормативних або рекомендованих значень може призводити до погіршення самопочуття працівників, зниження концентрації уваги, швидкої втоми, зменшення продуктивності праці та підвищення ймовірності виникнення помилок під час виконання технологічних операцій.

Одним із найважливіших параметрів, що впливає на умови праці, є температура повітря. Надмірно висока температура у приміщенні може спричиняти перегрів організму, втому, зниження працездатності та погіршення концентрації уваги. Занадто низька температура, у свою чергу, може призводити до переохолодження, дискомфорту та зниження ефективності роботи персоналу. Автоматизований контроль температури дозволяє оперативно виявляти небажані зміни теплового режиму та своєчасно вживати заходів для його нормалізації.

Відносна вологість повітря також має суттєвий вплив на комфорт і безпеку працівників. Низький рівень вологості може спричиняти сухість слизових оболонок, подразнення дихальних шляхів, підвищення рівня пилу та накопичення електростатичних зарядів. Надмірна вологість створює умови для розвитку плісняви, корозії обладнання та погіршення санітарного стану приміщення. Завдяки постійному контролю вологості система дає змогу своєчасно визначати несприятливі умови та приймати рішення щодо провітрювання, осушення або зволоження повітря.

Важливим показником якості повітря у виробничому приміщенні є концентрація вуглекислого газу. Підвищення рівня CO_2 свідчить про недостатню вентиляцію або надмірне накопичення повітря, що видихається людьми. За таких умов у працівників може виникати сонливість, головний біль, зниження уваги та загальна втома. Наявність датчика CO_2 у системі дозволяє контролювати концентрацію вуглекислого газу та своєчасно інформувати користувача про погану якість повітря за допомогою градієнтної індикації. Нормальний стан відображається м’ятним кольором, а підвищення концентрації CO_2 – градієнтом від жовтого до червоного, залежно від числового значення, що привертає увагу користувача до погіршення вентиляції.

Контроль рівня освітленості також має значення для безпеки та ефективності праці. Недостатнє освітлення ускладнює виконання точних операцій, підвищує навантаження на органи зору та може спричиняти швидку втому. Надмірне або нерівномірне освітлення також може створювати

дискомфорт, відблиски та знижувати якість сприйняття робочої зони. Вимірювання освітленості дає змогу оцінити відповідність умов праці потребам виробничого процесу та своєчасно виявляти проблеми з освітленням.

Окрему роль у системі відіграє контроль зовнішніх параметрів середовища. Зовнішній блок дозволяє отримувати інформацію про температуру, вологість, УФ-індекс та інші фактори поза приміщенням. Це дає змогу порівнювати внутрішні й зовнішні умови та краще оцінювати ефективність вентиляції або необхідність зміни режиму провітрювання. Наприклад, якщо зовнішнє повітря має нижчу температуру або сприятливіший рівень вологості, це може бути враховано під час організації повітрообміну.

Застосування автоматизованої системи контролю параметрів навколишнього середовища дозволяє зменшити залежність від періодичних ручних вимірювань. У традиційному підході контроль мікроклімату часто виконується лише час від часу, тому небезпечні або небажані зміни можуть бути виявлені із запізненням. Розроблена система працює у режимі постійного контролю, що забезпечує оперативне отримання інформації про стан середовища.

Також важливою перевагою системи є наявність візуальної індикації стану окремих параметрів середовища. У розробленому інтерфейсі передбачено кольорову індикацію наявності грозової активності, дані про яку надходять із зовнішнього блока. Такий підхід не замінює спеціалізовані системи оповіщення, однак підвищує інформативність інтерфейсу та дозволяє швидше звернути увагу на потенційно несприятливі умови.

Розроблена система позитивно впливає не лише на умови праці, а й на безпеку виробничого процесу загалом. Несприятливі параметри середовища можуть впливати на роботу електронного обладнання, точність вимірювальних приладів, стабільність технологічних процесів і якість продукції. Наприклад, підвищена температура може спричиняти перегрів електронних компонентів, а надмірна вологість – корозію контактів, пошкодження матеріалів або

погіршення роботи електричних з’єднань. Тому контроль мікроклімату є важливою складовою забезпечення надійності виробництва.

Для виробничих приміщень, у яких використовуються електронні пристрої, датчики, мікроконтролери або інше чутливе обладнання, стабільні умови середовища мають особливе значення. Різкі коливання температури, вологості або якості повітря можуть призводити до нестабільної роботи технічних засобів. Автоматизований контроль дозволяє своєчасно виявляти такі зміни та знижувати ризик виникнення несправностей.

Ще одним позитивним аспектом є підвищення інформованості персоналу. Користувач отримує не абстрактну оцінку стану приміщення, а конкретні числові значення параметрів, відображені на дисплеї. Це спрощує прийняття рішень і дозволяє краще розуміти, які саме фактори впливають на умови праці. Наприклад, працівник може побачити, що погіршення самопочуття пов’язане не лише з температурою, а й з підвищеним рівнем CO_2 або недостатньою вентиляцією.

Використання системи також може сприяти профілактиці професійних ризиків. Постійний контроль параметрів середовища дозволяє виявляти несприятливі тенденції ще до того, як вони призведуть до суттєвого погіршення умов праці. Наприклад, поступове зростання концентрації CO_2 може свідчити про недостатній повітрообмін, а підвищення вологості – про необхідність перевірки вентиляції або джерел вологи у приміщенні.

З погляду організації безпечного виробництва, розроблена система може використовуватися як допоміжний засіб контролю. Вона не замінює нормативні перевірки, спеціалізовані лабораторні вимірювання або засоби колективного захисту, але доповнює їх, забезпечуючи постійне спостереження за основними параметрами середовища. Такий підхід підвищує оперативність реагування на зміни умов праці та дозволяє швидше виявляти потенційно небезпечні ситуації.

Таким чином, впровадження автоматизованої системи контролю параметрів навколишнього середовища позитивно впливає на умови праці та безпеку виробництва. Система забезпечує безперервний контроль параметрів

мікроклімату, відображення поточних значень на дисплеї та кольорову індикацію окремих станів, зокрема рівня CO_2 і наявності грозової активності. Це дозволяє користувачу швидко оцінювати стан середовища, звертати увагу на потенційно несприятливі умови та приймати подальші рішення щодо провітрювання, перевірки вентиляції або контролю зовнішніх факторів. Її використання сприяє підвищенню рівня безпеки працівників, зниженню ризику аварійних ситуацій, покращенню стабільності роботи обладнання та підтриманню належних умов виробничого середовища.

3.7 Охорона праці

Забезпечення безпечних умов праці є важливою складовою організації будь-якого виробничого процесу. У межах даної кваліфікаційної роботи розглядається виробниче приміщення, призначене для розміщення обладнання фотополімерного 3D-друку та експлуатації автоматизованої системи контролю параметрів навколишнього середовища. Особливістю такого приміщення є поєднання електронного обладнання, джерел живлення, мікроконтролерних пристроїв, датчиків, елементів індикації, а також технологічного обладнання, робота якого може супроводжуватися зміною температури, вологості, якості повітря та появою шкідливих випаровувань [78].

Метою заходів з охорони праці у даному випадку є зниження впливу небезпечних і шкідливих виробничих факторів на працівників, забезпечення стабільних параметрів мікроклімату, запобігання аварійним ситуаціям та створення умов для безпечної експлуатації розробленої системи контролю [78].

Виробниче приміщення, у якому передбачається використання системи, має обмежену площу, тому розміщення декількох одиниць обладнання потребує особливої уваги до вентиляції, організації робочих місць, електробезпеки та контролю стану повітря. У процесі роботи 3D-принтерів можливе виділення тепла, а при використанні фотополімерних матеріалів – утворення запахів і випаровувань, які можуть негативно впливати на

самопочуття працівників. Крім того, недостатній повітрообмін може призводити до накопичення вуглекислого газу, зниження концентрації уваги, появи втоми та погіршення загального стану людини.

До основних небезпечних і шкідливих факторів, які можуть виникати у такому приміщенні, належать:

– відхилення температури повітря від допустимих значень;

– підвищена або знижена відносна вологість;

– недостатня ефективність вентиляції та накопичення CO_2;

– можливе утворення випаровувань фотополімерних матеріалів;

– вплив УФ-випромінювання, що використовується у процесах полімеризації;

– наявність електронного обладнання, блоків живлення та з'єднувальних провідників;

– ризик перегрівання окремих елементів системи;

– недостатня освітленість робочої зони;

– пожежна небезпека, пов'язана з використанням електричного обладнання.

Одним із ключових факторів безпеки є підтримання нормативних параметрів мікроклімату. Температура повітря впливає не лише на самопочуття працівників, але й на стабільність роботи електронних компонентів та якість технологічних процесів. Надмірне підвищення температури може спричиняти перегрів обладнання, прискорене старіння електронних елементів та зниження точності вимірювань. Зниження температури нижче комфортного рівня може викликати дискомфорт у працівників і зниження продуктивності праці.

Відносна вологість також має важливе значення. Надмірна вологість може сприяти появі корозійних процесів, погіршенню роботи електронних компонентів та розвитку грибків і плісняви. Занадто низька вологість сприяє пересиханню слизових оболонок, підвищенню кількості пилу в повітрі та накопиченню статичної електрики, що є небажаним у приміщеннях з електронним обладнанням.

Особливу увагу необхідно приділяти контролю якості повітря. Концентрація вуглекислого газу є важливим непрямим показником ефективності вентиляції. Підвищений рівень CO_2 може свідчити про недостатній повітрообмін у приміщенні. У таких умовах у працівників можуть виникати сонливість, головний біль, втома та зниження концентрації уваги. Тому контроль CO_2 у системі є важливим елементом забезпечення безпечних умов праці.

У приміщеннях з фотополімерним 3D-друком також необхідно враховувати можливість виділення летких речовин від фотополімерних смол. Навіть за відсутності різко вираженого запаху робота з такими матеріалами повинна здійснюватися за наявності ефективної припливно-витяжної вентиляції. Зберігання смол, очищення готових виробів і робота з витратними матеріалами повинні проводитися з дотриманням вимог безпеки, використанням засобів індивідуального захисту та недопущенням контакту матеріалів зі шкірою.

Розроблена автоматизована система контролю параметрів навколишнього середовища сприяє підвищенню рівня охорони праці, оскільки забезпечує безперервне вимірювання основних параметрів середовища та оперативне інформування користувача про їх зміну. Система дозволяє контролювати температуру, відносну вологість, концентрацію CO_2, атмосферний тиск, рівень освітленості та додаткові зовнішні параметри. У разі виходу показників за допустимі межі користувач може своєчасно вжити необхідних заходів: провітрити приміщення, перевірити роботу вентиляції, зменшити теплове навантаження, обмежити роботу обладнання або провести додатковий огляд стану робочої зони.

Важливою перевагою системи є наявність локального інтерфейсу відображення інформації. Виведення поточних параметрів на дисплей дозволяє працівнику швидко оцінити стан середовища без використання додаткових вимірювальних приладів. Кольорова індикація окремих параметрів, зокрема рівня CO_2, підвищує наочність роботи системи та спрощує сприйняття

інформації. Це особливо важливо у виробничих умовах, де працівник не завжди має час аналізувати числові значення параметрів.

Для забезпечення безпечної експлуатації апаратної частини системи необхідно дотримуватися вимог електробезпеки. Усі електронні модулі повинні живитися від джерел напруги, що відповідають їхнім технічним характеристикам. З'єднання між мікроконтролером, датчиками, дисплеєм, радіомодулем та іншими компонентами мають бути надійно закріплені й ізольовані. Не допускається експлуатація системи з пошкодженими провідниками, нестабільним живленням, перегрітими елементами або відкритими контактами, які можуть спричинити коротке замикання [78].

Окрему увагу слід приділити пожежній безпеці. У приміщенні, де працює електронне обладнання та 3D-принтери, необхідно уникати перевантаження електричної мережі, використовувати справні блоки живлення, не залишати обладнання без нагляду у разі нестабільної роботи та забезпечити доступ до первинних засобів пожежогасіння. Розміщення обладнання повинно забезпечувати вільний доступ до робочих місць, вентиляційних елементів, дверей і засобів аварійного вимкнення живлення.

Для зниження ризиків під час експлуатації системи необхідно виконувати такі організаційні заходи:

– проводити періодичну перевірку працездатності датчиків;

– контролювати справність вентиляційної системи;

– не допускати перекриття вентиляційних отворів обладнання;

– забезпечувати чистоту робочого місця та відсутність зайвих легкозаймистих матеріалів біля електронних пристроїв;

– використовувати засоби індивідуального захисту під час роботи з фотополімерними матеріалами;

– своєчасно реагувати на попередження системи про перевищення допустимих значень параметрів;

– проводити огляд кабельних з'єднань, блоків живлення та корпусів електронних модулів.

Таким чином, питання охорони праці у межах даної роботи пов’язані не лише з дотриманням загальних вимог безпеки, а й з особливостями експлуатації системи контролю параметрів навколишнього середовища у виробничому приміщенні. Розроблена система виконує важливу профілактичну функцію, оскільки дозволяє своєчасно виявляти несприятливі зміни мікроклімату, контролювати ефективність вентиляції та попереджати користувача про потенційно небезпечні умови. Її використання сприяє підвищенню рівня безпеки працівників, зниженню ризику аварійних ситуацій, покращенню умов праці та забезпеченню стабільної роботи технологічного обладнання.

Для забезпечення комфортних та безпечних умов праці у виробничому приміщенні необхідно передбачити достатній рівень освітленості робочої зони. У межах даної роботи розглядається приміщення, у якому розміщується макет автоматизованої системи контролю параметрів навколишнього середовища, електронні компоненти, а також обладнання для 3D-друку. Оскільки робота з таким обладнанням потребує візуального контролю, підключення електронних модулів, перевірки показників на дисплеї та обслуговування пристроїв, недостатня освітленість може призводити до швидкої втоми очей, зниження концентрації уваги та підвищення ризику помилок під час роботи.

Для розрахунку необхідного рівня освітлення приймаємо розміри приміщення 3 м × 4 м. Площа приміщення визначається за формулою:

$$S = a \times b, \tag{3.18}$$

де S – площа приміщення, м²;

a – довжина приміщення, м;

b – ширина приміщення, м.

Підставимо значення:

$$S = 3 \times 4 = 12 \text{ м}^2. \tag{3.19}$$

Для приміщень, у яких виконуються роботи з електронним обладнанням, візуальним контролем показників та обслуговуванням технічних засобів, доцільно прийняти рекомендований рівень освітленості 500 лк. Необхідний світловий потік визначається за формулою:

$$Ф = E_н \times S, \quad (3.20)$$

де Ф – необхідний світловий потік, лм;

$E_н$ – нормована освітленість, лк;

S – площа приміщення, м².

Підставимо значення:

$$Ф = 500 \times 12 = 6000 \text{ лм}. \quad (3.21)$$

Отже, для забезпечення освітленості 500 лк у приміщенні площею 12 м² необхідно забезпечити світловий потік не менше 6000 лм. Однак у реальних умовах частина світлового потоку втрачається через відбиття від стін, стелі, меблів, обладнання, а також через забруднення світильників у процесі експлуатації. Тому доцільно враховувати коефіцієнт запасу.

З урахуванням коефіцієнта запасу формула набуває вигляду:

$$Ф_{заг} = E_н \times S \times K_з, \quad (3.22)$$

де $Ф_{заг}$ – загальний необхідний світловий потік з урахуванням запасу, лм;

$E_н$ – нормована освітленість, лк;

S – площа приміщення, м²;

$K_з$ – коефіцієнт запасу.

Для приміщення з електронним обладнанням приймаємо коефіцієнт запасу $K_з = 1{,}3$.

$$\Phi_{заг} = 500 \times 12 \times 1{,}3 = 7800 \text{ лм.} \quad (3.23)$$

Таким чином, для якісного освітлення приміщення площею 12 м² необхідно забезпечити загальний світловий потік приблизно 7800 лм. Якщо використовувати світлодіодні світильники зі світловим потоком близько 1200 лм кожен, необхідна кількість світильників визначається за формулою:

$$N = \frac{\Phi_{заг}}{\Phi_{св}}, \quad (3.24)$$

де N – кількість світильників;

$\Phi_{заг}$ – загальний необхідний світловий потік, лм;

$\Phi_{св}$ – світловий потік одного світильника, лм.

Підставимо значення:

$$N = \frac{7800}{1200} = 6{,}5. \quad (3.25)$$

Отримане значення округлюємо у більшу сторону. Отже, для забезпечення необхідного рівня освітленості доцільно використати 7 світлодіодних світильників зі світловим потоком приблизно 1200 лм кожен або меншу кількість світильників більшої потужності, сумарний світловий потік яких становитиме не менше 7800 лм.

Раціональне розміщення світильників має забезпечувати рівномірне освітлення робочої зони, дисплея системи, місця розташування 3D-принтерів та зони обслуговування електронного обладнання. Світильники необхідно встановлювати таким чином, щоб уникати різких тіней, засліплення працівника та відблисків на екрані дисплея. Достатній рівень освітленості сприяє зниженню втоми, підвищенню точності виконання робіт, безпечному

обслуговуванню обладнання та своєчасному виявленню несправностей або відхилень у роботі системи.

Отже, для приміщення розміром 3 м × 4 м рекомендовано забезпечити освітленість не менше 500 лк, що відповідає загальному світловому потоку приблизно 7800 лм з урахуванням коефіцієнта запасу. Це дозволяє створити комфортні та безпечні умови для експлуатації автоматизованої системи контролю параметрів навколишнього середовища, роботи з електронними компонентами та обслуговування обладнання 3D-друку.

ВИСНОВКИ

У кваліфікаційній роботі вирішено актуальне науково-практичне завдання, пов’язане з розробкою автоматизованої системи контролю параметрів навколишнього середовища у виробничих приміщеннях.

У ході аналізу предметної області встановлено, що параметри навколишнього середовища у виробничих приміщеннях мають комплексний вплив на умови праці та можуть бути поділені на фізичні, хімічні та біологічні чинники. Визначено, що найбільш доцільними для автоматизованого контролю є температура повітря, відносна вологість, концентрація вуглекислого газу, атмосферний тиск, рівень освітленості, а також окремі зовнішні параметри, зокрема УФ-індекс і грозова активність. Проведений аналіз вимог до систем контролю показав, що така система повинна забезпечувати безперервний збір, обробку, передачу та візуалізацію даних, бути надійною, енергоефективною, зручною в експлуатації та придатною до подальшого розширення.

У результаті огляду сучасних технологій і засобів автоматизації встановлено доцільність використання мікроконтролерних платформ, сенсорних модулів і бездротових каналів зв’язку для побудови системи контролю параметрів середовища. Аналіз існуючих рішень показав, що готові комерційні системи мають достатній функціонал, однак часто характеризуються високою вартістю, обмеженою гнучкістю та залежністю від екосистеми виробника. Це підтвердило доцільність розробки власної автоматизованої системи, адаптованої до конкретних умов використання у виробничому приміщенні.

У процесі проєктування системи обґрунтовано вибір централізованої архітектури з віддаленим вузлом збору даних. Така структура передбачає використання внутрішнього блока як основного пристрою обробки та відображення інформації, а зовнішнього блока – як автономного сенсорного модуля для вимірювання параметрів зовнішнього середовища. Обрана

архітектура забезпечує простоту реалізації, зручне розміщення датчиків, бездротове передавання даних між блоками та можливість подальшої модернізації системи.

У ході вибору технічних засобів визначено апаратну основу системи. Для внутрішнього блока обрано мікроконтролер ESP32, який забезпечує достатню продуктивність, підтримку необхідних інтерфейсів та можливість роботи з дисплеєм і датчиками. Для зовнішнього блока обрано Arduino Pro Mini 3,3 В, що є доцільним рішенням для автономного пристрою з низьким енергоспоживанням. Для вимірювання параметрів середовища обрано датчики BME280, MH-Z19D, VEML7700, SHT40, GUVA-S12SD, AS3935 та INA219. Для передавання даних між блоками обрано модуль SX1278 LoRa, який забезпечує достатню дальність зв’язку, стабільність передавання даних і низьке енергоспоживання в режимі очікування.

У роботі розроблено структурну схему системи, алгоритми роботи внутрішнього та зовнішнього блоків, алгоритм перевірки коректності показників датчика CO_2 під час прогрівання, а також алгоритм керування яскравістю дисплея. Запропоновані алгоритми забезпечують періодичне зчитування даних із датчиків, перевірку коректності вимірювань, передавання інформації між блоками, оновлення користувацького інтерфейсу та відображення службових параметрів системи. Це дозволяє забезпечити стабільну роботу пристрою та підвищити достовірність даних, які відображаються користувачу.

Практична реалізація системи виконана з використанням середовища Visual Studio Code та розширення PlatformIO. Розроблено схеми підключення компонентів внутрішнього та зовнішнього блоків, що забезпечують взаємодію мікроконтролерів, датчиків, дисплея, енкодера, модулів бездротового зв’язку та вузлів живлення. Для конструктивного оформлення системи створено 3D-моделі корпусів внутрішнього і зовнішнього блоків у середовищі Fusion 360. У конструкції передбачено розміщення електронних компонентів, дисплея, енкодера, датчиків, акумулятора, сонячної зарядки, радіомодуля, радіаційного

екрана для датчика SHT40 та кріплень для датчиків УФ-випромінювання і грозової активності.

У результаті розробки користувацького інтерфейсу в середовищі Figma реалізовано зручне відображення параметрів внутрішнього та зовнішнього середовища, службових даних і налаштувань системи. Інтерфейс дозволяє користувачу переглядати поточні, мінімальні та максимальні значення параметрів, оцінювати стан зв'язку, заряд акумулятора зовнішнього блока та наявність грозової активності. Для підвищення наочності передбачено кольорову індикацію рівня CO_2 та стану грозової активності, що дозволяє швидко звернути увагу на потенційно небезпечні або небажані умови.

Проведена перевірка роботи системи підтвердила коректність зчитування, обробки, передавання та відображення даних. За результатами оцінки точності встановлено, що абсолютне відхилення температури становить від 0,2 °C до 0,6 °C, відносне відхилення – від 0,77 % до 2,31 %, а відхилення атмосферного тиску становить 0,05 гПа. Такі результати підтверджують достатню точність роботи системи для контролю параметрів мікроклімату у виробничому приміщенні. Водночас виявлене відхилення показників вологості зовнішнього блока вказує на необхідність повторної перевірки умов розміщення датчика під час подальшого вдосконалення системи.

У ході оцінки впливу розробленої системи на умови праці встановлено, що її застосування сприяє підвищенню рівня безпеки виробничого середовища, своєчасному виявленню несприятливих параметрів мікроклімату, контролю якості повітря, рівня освітленості та зовнішніх умов. Розглянуті питання охорони праці дозволили визначити основні небезпечні та шкідливі фактори, які можуть виникати під час експлуатації системи, а також обґрунтувати необхідність дотримання вимог електробезпеки, пожежної безпеки, ергономіки робочого місця та безпечної роботи з електронним обладнанням.

Наукова новизна роботи полягає у розробці підходу до побудови автоматизованої системи контролю параметрів навколишнього середовища у виробничих приміщеннях на основі поєднання внутрішнього центрального

блока, автономного зовнішнього сенсорного модуля, бездротового зв’язку LoRa, функції виявлення наявності грозової активності та визначення орієнтовної відстані до неї, комплексу датчиків мікроклімату та користувацького інтерфейсу з кольоровою індикацією стану середовища. Практична цінність роботи полягає у можливості використання розробленої системи для локального контролю параметрів мікроклімату у виробничих приміщеннях, лабораторіях, майстернях, навчально-виробничих комплексах та інших об’єктах, де необхідно забезпечити контроль умов праці.

Таким чином, мету кваліфікаційної роботи досягнуто. У роботі проаналізовано предметну область, сформульовано вимоги до системи, обґрунтовано вибір архітектури та технічних засобів, розроблено структурну схему, алгоритми функціонування, схеми підключення, корпуси, користувацький інтерфейс і проведено перевірку працездатності системи. Отримані результати підтверджують можливість практичного використання розробленої автоматизованої системи для контролю параметрів навколишнього середовища у виробничих приміщеннях та створюють основу для її подальшого вдосконалення шляхом додавання нових датчиків, розширення функцій сповіщення, збереження історії вимірювань і реалізації автоматичного керування вентиляцією або іншими виконавчими пристроями.

ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАНЬ

1. ДСТУ 3008-15. Документація. Звіти у сфері науки та техніки. структура та правила оформлення. Введ. 2015-06-22. К. Держстандарт України, 2017. – 29 с.

2. Методичні вказівки з підготовки кваліфікаційної роботи бакалавра для здобувачів першого (бакалаврського) рівня вищої освіти спеціальності 151 Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології освітньої програми «Системна інженерія» / Упоряд.: І.Ш. Невлюдов, О.М. Цимбал, О.В. Токарєва, А.І. Бронніков. Харків: ХНУРЕ, 2022. – 66 с.

3. Фесенко А. О. Аналіз характеристик параметрів навколишнього середовища у виробничих приміщеннях / А. О. Фесенко // Автоматизація та Приладобудування («Automation and Development of Electronic Devices» ADED-2025) : збірник студентських наукових статей. – Харків : ХНУРЕ, 2025. – Вип. 2. – С. 164-170.

4. Fesenko A. Selection of Communication Interfaces for a Microclimate Monitoring System / A. Fesenko, S. Sotnik // Intelligent Civil Safety Technologies and Robotic Systems for Emergency and Rescue Operations 2026 (ICSTRO-2026) : Proceedings of I-st All-Ukrainian Conference, Kharkiv, February 12-13, 2026. – Kharkiv : NURE, 2026. – P. 72-76.

5. До листа Мінфіну від 09.07.99 р. N 31-3-2-3-8/3202 : Лист Каб. Міністрів України від 19.07.1999 № 12084/29. URL: https://zakon.rada.gov.ua/rada/show/va042282-99#Text (дата звернення: 18.04.2026).

6. Коренівська, О. Л. Аспекти побудови систем моніторингу параметрів мікроклімату в навчальних аудиторіях / О. Л. Коренівська, В. Б. Бенедицький, Т. М. Нікітчук // Технічна інженерія, 2022. – 2 (90). – С. 136-143.

7. Класифікація небезпечних і шкідливих виробничих факторів - Охорона праці і пожежна безпека. *Охорона праці і пожежна безпека*. URL: https://oppb.com.ua/articles/klasyfikaciya-nebezpechnyh-i-shkidlyvyh-

vyrobnychyh-faktoriv (дата звернення: 18.04.2026).

8. Фізичні фактори виробничого середовища: вплив на здоров'я людини - Статті - Донецький обласний центр контролю та профілактики хвороб. *Донецький обласний центр контролю та профілактики хвороб*. URL: https://dn.cdc.gov.ua/article/fizychni-faktory-vyrobnychogo-seredovyshha-vplyv-na-zdorov-ya-lyudyny/ (дата звернення: 18.04.2026).

9. Сусліков Л. М. Охорона праці в галузі нанотехнологій : навч. посіб. для студ. спец. 105 «Прикладна фізика та наноматеріали» / Л. М. Сусліков ; рец. : В. М. Рубіш, В. І. Феделеш ; М-во освіти і науки України, ДВНЗ «Ужгородський національний університет». – Ужгород : Говерла, 2023. – 292 с. : іл. – Бібліогр.: с. 291.

10. Чубак, С. Параметри мікроклімату виробничих приміщень / С. Чубак // Матеріали IX Міжнародної студентської науково-технічної конференції „Природничі та гуманітарні науки. Актуальні питання", 2026. – С. 311-312.

11. Васильченко, Є. Автоматизована система контролю та керування параметрами мікроклімату у виробничому приміщенні при складанні приладів / Є. Васильченко // Матеріали VII Міжнародної студентської науково-технічної конференції „Природничі та гуманітарні науки. Актуальні питання", 2024. – С. 269-271.

12. Васильченко, Є. Система керування мікрокліматичними параметрами виробничого приміщення / Є. Васильченко, В. Шевченко // Міжнародний науково-технічний журнал ISSN 2219-9365 «Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах», 2024. – №4. – С. 256-264.

13. Ковальська Л.Л. Економіка підприємства : підручник / Л.Л. Ковальська, І.В. Кривов'язюк. – Київ: Видавничий дім «Кондор», 2020. – 700 с.

14. Пилипчук І. В. Комп'ютерна система контролю рівня води і температури в плавальних басейнах : робота на здобуття кваліфікаційного ступеня бакалавра : спец. 123 - комп'ютерна інженерія / наук. кер. А. М. Луцків. Тернопіль : Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя, 2024. 74 с.

15. Що таке IoT технологія та як використовувати Інтернет речей | Київстар для бізнесу. *Kyivstar Business Hub – корпоративний блог для бізнесу*. URL: https://hub.kyivstar.ua/articles/shho-take-iot-tehnologiya-ta-yak-vona-vplyvaye-na-rizni-galuzi (дата звернення: 18.04.2026).

16. Fesenko A. O. Basic provisions for developing an automated system for monitoring microclimate parameters in industrial premises / A. O. Fesenko, S. Sotnik // Information Technologies and Automation – 2025 : Proceedings of the XVIII International Scientific and Practical Conference, October 30-31, 2025. – Odessa : ONUT Publishing House, 2025. – p. 194-197.

17. Fesenko A. Review and selection of optimal sensors for building a production facility microclimate monitoring system / A. Fesenko, S. Sotnik // Виробництво & Мехатронні Системи 2025 : тези доповідей IX-ої Міжнародної конференції, 25-26 жовтня 2025 р. – Харків, 2025. – С. 50-53.

18. Андреєв О. В. ОСОБЛИВОСТІ ВИКОРИСТАННЯ МІКРОКОНТРОЛЕРІВ ДЛЯ СТВОРЕННЯ РАДІОКАНАЛІВ ПЕРЕДАВАННЯ ДАНИХ В БЕЗДРОТОВИХ СЕНСОРНИХ МЕРЕЖАХ / О. В. Андреєв, А. С. Главацький, Н. П. Маляренко // «Комп'ютерні технології: інновації, проблеми, рішення», м. Житомир, 01–02 грудня 2022 р. – Житомир: Житомирська політехніка, 2022. – С. 227-228.

19. Невлюдов, І. Ш. Техніко-економічне обґрунтування інтелектуальному виробництві: Підручник / І. Ш. Невлюдов. – Кривий Ріг: видавець Чернявський Д.О., 2024 – 388 с.

20. Сервіс Blynk - Безпека та відеоспостереження. *Безпека та відеоспостереження*. URL: https://oxorona.com/blynk/ (дата звернення: 19.04.2026).

21. Невлюдов І. Ш. Node-RED та технологія промислового Інтернету речей : навч. посіб. / І. Ш. Невлюдов, С. П. Новоселов, О. В. Сичова ; М-во освіти і науки України, Харків. нац. ун-т радіоелектроніки. – Харків: Вид-во Іванченка І. С., 2024. – 207 с.

22. Кришталь С. О. Порівняння варіантів архітектури інформаційної

системи “розумний будинок” / С. О. Кришталь, М. В. Максимнюк, Д. П. Проценко // Молодь в науці: дослідження, проблеми, перспективи (МН-2025), 2025 - 1-4 с.

23. Чертанов Я. В. Підхід до вибору протоколу та архітектури автономної ділянки граничного шару IoT / Я. В. Чертанов, А. А. Коваленко, В. В. Філіппов // Системи управління, навігації та зв’язку, 2026. – №1(83). – 224-230 с.

24. Бінько І. Комплексний підхід до управління формуванням групи роботів / І. Бінько, В. Шевель, Д. Крицький // Сучасний стан наукових досліджень та технологій в промисловості, 2024. – №2(28). – 17-32 с.

25. 3D-принтер Elegoo Saturn 4 Ultra 16K (50.101.038300). *TOUCH*. URL: https://touch.com.ua/ua/item/3d-printer-elegoo-saturn-4-ultra-16k-50-101-038300/ (дата звернення: 30.04.2026).

26. Плата розробника ESP32 Type-C ESP-WROOM-32 30 Pin (Wi-Fi + Bluetooth) - купити в ESide | Ціна 165 грн. *ESide*. URL: https://eside.shop/item/esp32-devkitc-32-30p (дата звернення: 30.04.2026).

27. Arduino Nano V3.0 ATmega328PB CH340 TYPE-C - купити в ESide | Ціна 90 грн. *ESide*. URL: https://eside.shop/item/arduino-nano-v3-ch340-typec (дата звернення: 30.04.2026).

28. Мікроконтролер Raspberry Pi Pico (replica) - купити в ESide | Ціна 130 грн. *ESide*. URL: https://eside.shop/item/raspberry-pi-pico-sc0918 (дата звернення: 30.04.2026).

29. Evans C. Raspberry Pi Pico vs Arduino Nano vs STM32 Blue Pill vs ESP32 vs STM32 Black Pill | Comparison. *AMPHEO PTY LTD*. URL: https://www.ampheo.com/blog/raspberrypi-pico-vs-arduino-nano-vs-stm32-blue-pill-vs-esp32-vs-stm32-black-pill-comparison?srsltid=AfmBOoo3MClPddVQaeU-tC7BXLXMbsQjsGaHB-qlThOCoEA7Z04MQXa8 (date of access: 01.05.2026).

30. Demir, H. Power Consumption Analysis of ESP32 and Arduino Nano for Low-Power Applications / H. Demir // In: 2025 9th International Symposium on Innovative Approaches in Smart Technologies (ISAS). IEEE, 2025.– p. 1-4.

31. Raspberry Pi Pico RP2040. *Mini-Tech*. URL: https://www.mini-tech.com.ua/ua/pico (date of access: 02.05.2026).

32. BME280 Цифровий датчик Температурна вологість Датчик барометричного тиску GY-BME280 I2C SPI 1.8-5V - Kuongshun Electronic. *Arduino ООН, Малина ПІ 3В, Найкращий 3D Принтер 2019 - Куонгшунь електронні*. URL: https://ua.sz-kuongshun.com/uno/uno-sensor/bme280-digital-sensor-temperature-humidity.html (date of access: 03.05.2026).

33. Барометр BME280 5В I2C (датчик температури, вологості, тиску) купити в Києві та Україні. *Arduino в Україні*. URL: https://arduino.ua/prod1930-bme280-5v-i2c-datchik-temperatyri-vlajnosti-davleniya?srsltid=AfmBOorUay0CGxcTbgdozbdEGF7fDf2us2sVCukmxs17B0pwIb4htnHh (дата звернення: 03.05.2026).

34. BMP280 барометр | I2C, SPI, ±0.12hPa. Arduino сумісний. *Мій Проект*. URL: https://myproject.com.ua/bmp280-barometr-datchik-atmosfernogo-tisku-ua.html (дата звернення: 03.05.2026).

35. SHT31 - Цифровий датчик вологості - Купити датчики в Україні, Харків. *1wire.com.ua*. URL: https://1wire.com.ua/sht31-i2c-datchik-vlazhnosti.html (дата звернення: 03.05.2026).

36. MH-Z19B ndir CO2 sensor for indoor air quality monitoring--Winsen. *Winsen Gas Sensor_CO2 Sensor_Air Quality Sensor_Dust Sensor_CO Sensor-Winsen Electronics*. URL: https://www.winsen-sensor.com/sensors/co2-sensor/mh-z19b.html?campaignid=10468521783&adgroupid=106296879720&feeditemid=&targetid=dsa-920472781901&device=c&creative=789593251106&keyword=&gad_source=1&gad_campaignid=10468521783&gbraid=0AAAAACTVC9Rp2VLhHt6RvhdCdLnXLJ46W&gclid=EAIaIQobChMIqKeWv9eflAMVGyqiAx3rtx0aEAAYASAAEgLIJfD_BwE (date of access: 04.05.2026).

37. MH-Z19C модуль NDIR CO2. *Winsen CO2 CO-Winsen Electronics*.

URL: https://uk.winsen-sensor.com/product/mh-z19c.html?campaignid=14649470064&adgroupid=125073479017&feeditemid=&targetid=kwd-1258557176060&device=c&creative=545820908116&keyword=mh%20z19c&gad_source=1&gad_campaignid=14649470064&gbraid=0AAAAACTVC9Tml8ZMcMsz0BX01rLiR-UIu&gclid=EAIaIQobChMIsqCAxdeflAMVP0-RBR3smxowEAAYASAAEgJpqfD_BwE (date of access: 04.05.2026).

38. Модуль NDIR CO19 MH- Z2D. *Winsen CO2 CO-Winsen Electronics*. URL: https://uk.winsen-sensor.com/product/mh-z19d.html?feeditemid=&targetid=kwd-174790579&device=c&creative=629273636601&keyword=carbon%20dioxide%20sensor/1000 (date of access: 04.05.2026).

39. MH-Z19 CO2 Sensor - Tasmota. *Redirecting to Tasmota Documentation*. URL: https://tasmota.github.io/docs/MH-Z19B/#model-comparison (date of access: 04.05.2026).

40. VEML7700 модуль датчика освітленості, 16 біт, I2C, 3.3 5 В, ціна: 153.39 ₴, купити на Prom.ua. *Prom.ua*. URL: https://prom.ua/m-1114482641418126042-veml7700-modul-datchika.html?p=2898636804 (дата звернення: 04.05.2026).

41. TSL2561 - Цифровий датчик освітленості - Купити датчики в Україні, Харків. *1wire.com.ua*. URL: https://1wire.com.ua/tsl2561-cifrovoj-datchik-osveshhennosti.html (дата звернення: 04.05.2026).

42. Датчик освітленості цифровий BH1750FVI GY-302 GY 302 GY302 BH 1750 BH-1750 купити в Києві та Україні. *Arduino в Україні*. URL: https://arduino.ua/prod1116-datchik-osveshhennosti-cifrovoi-bh1750fvi?srsltid=AfmBOoqzXIxwqOtBNgW6Shxb6ggTQuaOdbuwMHT2_L0TSOZtWP66Pd76 (дата звернення: 04.05.2026).

43. Neues 4,0 Zoll spi serielle Schnitts telle LCD-Touchscreen-Modul 480*320 (kostenloser Versand) tft Display ili9488 hd elektronisch stm32 esp32 ar c51 -

AliExpress

502. *aliexpress.* URL: https://www.aliexpress.com/item/1005005791515997.html?spm=a2g0o.order_list.order_list_main.10.a8991802MNiQf0#nav-specification (date of access: 04.05.2026).

44. TFT LCD 3.2 ILI9325 320x240 16bit Touch panel Arduino, STM32 від інтернет-магазину електронних компонентів "DiyLab". *Електронні плати, комп`ютери, компоненти для радіоелектроніки*. URL: https://diylab.com.ua/p505298025-tft-lcd-ili9325.html (дата звернення: 04.05.2026).

45. OLED дисплей 0.96" I2C 128x64 (синій) купити в Києві та Україні. Arduino в Україні. URL: https://arduino.ua/prod1264-oled-displei-modyl-sinii?srsltid=AfmBOoqZXKQPqsip11VN9NeA5IOI7yVOXIrQcLTmh4UNvEyKBP53fQwB (дата звернення: 04.05.2026).

46. Arduino Pro Mini 3.3V ATMega328. *Mini-Tech*. URL: https://www.mini-tech.com.ua/ua/arduino-pro-mini-3v3 (date of access: 05.05.2026).

47. Спужак В. А. Система автоматизованого поливу полів : пояснювальна записка до кваліфікаційної роботи здобувача вищої освіти на першому (бакалаврському) рівні, спеціальність 151 Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології / В. А. Спужак – Київ, 2025. – 61 с.

48. SHT40: Humidity and Temperature Sensor : datasheet / Sensirion AG. 2021. 24 с. URL: https://www.sensirion.com/file/datasheet_sht40 (дата звернення: 05.05.2026).

49. Купити DS18B20-MODUL Датчик температури цифровий на складі КОСМОДРОМ, Харків, Україна. *Космодром | інтернет магазин радіодеталей в Харків, Україна.* URL: https://kosmodrom.ua/datchik-temperatury-cifrovoy-termodatchik/ds18b20-modul.html (дата звернення: 05.05.2026).

50. DHT22 Temperature and Humidity Sensor. Datasheet. URL: https://arduino.ua/docs/DHT22.pdf (дата звернення: 05.05.2026).

51. LoRa vs WiFi vs Bluetooth: Which IoT Protocol to Use? // Zbotic. URL: https://zbotic.in/lora-vs-wifi-vs-bluetooth-which-iot-protocol-to-use/ (дата

звернення: 05.05.2026).

52. Бездротовий модуль з розширеним спектром LoRa SX1278 433МГц RA-01 // BeeGreen. URL: https://beegreen.com.ua/bezdrotovij-modul-z-rozshirenim-spektrom-lora-sx1278-433mhz-ra-01-16401 (дата звернення: 06.05.2026).

53. NRF24L01 трансивер 2,4GHz. *НОВІ НАДХОДЖЕННЯ - РКС Компоненти - РАДІОМАГ*. URL: https://www.rcscomponents.kiev.ua/product/nrf24l01-transyver-2-4ghz_113611.html (дата звернення: 06.05.2026).

54. HC-12 Wireless Serial Port Communication Module : datasheet / Elecrow. URL: https://www.elecrow.com/download/HC-12.pdf (дата звернення: 06.05.2026).

55. Quick-Teck Standard PCB Stack-Up Construction : datasheet / Quick-Teck Electronics. URL: https://www.quick-teck.co.uk/Management/EEUploadFile/1457536605.pdf (дата звернення: 06.05.2026).

56. nRF24L01 Product Specification v2.0 : datasheet / Nordic Semiconductor. URL: https://www.mouser.com/datasheet/2/297/nRF24L01_Product_Specification_v2_0-9199.pdf (дата звернення: 06.05.2026).

57. Купити MCP1700-3302E/TO Стабілізатор напруги на складі КОСМОДРОМ, Харків, Україна. *Космодром | інтернет магазин радіодеталей в Харків, Україна.* URL: https://kosmodrom.ua/stabilizator-napryazheniya/mcp1700-3302e-to.html (дата звернення: 07.05.2026).

58. Купити AMS1117-3.3 Стабілізатор напруги на складі КОСМОДРОМ, Харків, Україна. *Космодром | інтернет магазин радіодеталей в Харків, Україна.* URL: https://kosmodrom.ua/stabilizator-naprugi/ams1117-3-3.html (дата звернення: 07.05.2026).

59. LM1117 voltage regulator: Pinout, Features, Specifications, Circuits and Applications. *Online Electronic Components Distributor-Bitfoic Electronics*. URL: https://www.bitfoic.com/components/lm1117-voltage-regulator-pinout-features-specifications-circuits-and-applications?id=151 (date of access: 07.05.2026).

60. MCP1700. Low Quiescent Current LDO : datasheet / Microchip Technology Inc. URL: https://ww1.microchip.com/downloads/en/DeviceDoc/MCP1700-Low-Quiescent-Current-LDO-20001826E.pdf (дата звернення: 07.05.2026).

61. AMS1117. Low Dropout Linear Regulator : datasheet / Advanced Monolithic Systems. URL: https://www.mini-tech.com.ua/download/datasheet/power_supply/ams1117.pdf (дата звернення: 07.05.2026).

62. CN3065. Lithium Ion Battery Charger for Solar-Powered Systems : datasheet / Consonance. URL: https://raw.githubusercontent.com/SeeedDocument/Lipo_Rider_Pro/master/res/DSE-CN3065.pdf (дата звернення: 09.05.2026).

63. TP4056. 1A Standalone Linear Li-lon Battery Charger with Thermal Regulation : datasheet. URL: https://dlnmh9ip6v2uc.cloudfront.net/datasheets/Prototyping/TP4056.pdf (дата звернення: 09.05.2026).

64. MCP73831 Family. Data Sheet : datasheet / Microchip Technology Inc. URL: https://ww1.microchip.com/downloads/aemDocuments/documents/APID/ProductDocuments/DataSheets/MCP73831-Family-Data-Sheet-DS20001984H.pdf (дата звернення: 09.05.2026).

65. Revolutionary Lightning Sensor: 40km Detection & I2C Ready!. *DFRobot Open-Source Hardware Electronics and Kits*. URL: https://www.dfrobot.com/product-1828.html?srsltid=AfmBOop365mT0LDr1XbLY4JZmyxGQeKdndIr5GCdt3yx5ea7-n6zNRUu (date of access: 10.05.2026).

66. AS3935. Franklin Lightning Sensor IC : datasheet EN v2 / AMS (Austria Micro Systems). URL: https://cdn.sparkfun.com/assets/learn_tutorials/9/2/1/AS3935_Datasheet_EN_v2.pdf (дата звернення: 10.05.2026).

67. Датчик ультрафіолету GUVA-S12SD купити в Києві та Україні. *Arduino в Україні*. URL: https://arduino.ua/prod1430-datchik-yltrafiolety-guva-s12sd?srsltid=AfmBOopmcNtcJUTuAvWE2Argl7-SDPDXCboQoL7yvAc72KUj7FNoY8EV (дата звернення: 10.05.2026).

68. ML8511 - Датчик ультрафіолетового випромінювання UV-A, UV-B - Купити датчики в Україні, Харків. *1wire.com.ua*. URL: https://1wire.com.ua/ml8511-datchik-uv.html (дата звернення: 10.05.2026).

69. VEML6075. UVA and UVB Light Sensor with I2C Interface : datasheet / Vishay. URL: https://cdn.sparkfun.com/assets/3/c/3/2/f/veml6075.pdf (дата звернення: 10.05.2026).

70. Датчик модуль дільник напруги Arduino. *BeeGreen*. URL: https://beegreen.com.ua/datchik-modul-dilnik-naprugi-arduino-10413 (дата звернення: 11.05.2026).

71. Цифровий датчик струму та напруги на INA219 з шиною I2C купити в Києві та Україні. *Arduino в Україні*. URL: https://arduino.ua/prod1661-cifrovoi-datchik-toka-i-napryajeniya-na-ina219-s-shinoi-i2c?srsltid=AfmBOooV760qgy8mDv_-1BcuoHvqPcqpzFlm5PAGDg_My72ZZjcKARVc (дата звернення: 11.05.2026).

72. Теорія автоматичного управління (збірник задач) [Текст]: навч. посіб. для спеціальності 151 Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології / І.Ш. Невлюдов, О.В. Токарєва; Харків. нац. ун-т радіоелектроніки. -Харків: Панов А.М., 2020. – 240 с.

73. Mean Well. LRS-100-12 100W Single Output Switching Power Supply. Datasheet. 2022. 4 p. (Розділ 2 - Блок живлення).

74. Куцевич І. В. Теорія automatic керування : навч. посібник. Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2021. 240 с. (Розділ 3 - ТАУ).

75. PlatformIO IDE - Visual Studio Marketplace. *Extensions for Visual Studio family of products | Visual Studio Marketplace*. URL: https://marketplace.visualstudio.com/items?itemName=platformio.platformio-ide (date of access: 09.06.2026).

76. PlatformIO IDE for VSCode – PlatformIO latest documentation. *Redirecting...* URL: https://docs.platformio.org/en/latest/integration/ide/vscode.html#user-guide (date of access: 09.06.2026).

77. Meteocast. Extended forecast: Konotop [Електронний ресурс]. URL: https://meteocast.ua/extended-forecast/ua/konotop/ (дата звернення: 18.06.2026).

78. Методичні вказівки до виконання розділу "Охорона праці" у випускних роботах ОКР "бакалавр" усіх форм навчання / упоряд.: В. А. Айвазов. Т. Є. Стиценко., Н. Л. Березуцька ; М-во освіти і науки України,ХНУРЕ. – Харків : ХНУРЕ, 2018. – 28 с.