

**Міністерство освіти і науки України**

**Луцький національний технічний університет**

(повне найменування закладу вищої освіти)

**Факультет комп'ютерних та інформаційних технологій**

(повне найменування факультету)

**Кафедра комп'ютерної інженерії та безпеки**

(повне найменування кафедри)

**КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА  
ЗА СТУПЕНЕМ ВИЩОЇ ОСВІТИ «БАКАЛАВР»**

**СИСТЕМА КОНТРОЛЮ ВОЛОГОСТІ СКЛАДІВ ПІДПРИЄМСТВА  
ДЕРЕВООБРОБКИ НА БАЗІ МІКРОКОНТРОЛЕРА ESP-32**

**HUMIDITY CONTROL SYSTEM FOR WAREHOUSES OF A  
WOODWORKING ENTERPRISE BASED ON THE ESP-32  
MICROCONTROLLER**

спеціальність 123 Комп'ютерна інженерія  
(шифр і назва спеціальності)

освітня програма Комп'ютерна інженерія  
(назва освітньої програми)

Виконав: здобувач вищої освіти  
групи КІ-42  
Лошик Дмитро Валерійович

(підпис)

Керівник:  
к.т.н., доцент  
Христинець Наталія Анатоліївна

(підпис)

Кваліфікаційну роботу  
допущено до захисту  
« 04 » червня 2025 р.

Гарант освітньої програми:

к.т.н., доцент  
Лавренчук Світлана Василівна

(підпис)

Луцьк – 2025 року

ЛУЦЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

Факультет комп'ютерних та інформаційних технологій

Кафедра комп'ютерної інженерії та безпеки

Ступінь вищої освіти: бакалавр

Галузь знань: 12 Інформаційні технології

Спеціальність: 123 Комп'ютерна інженерія

Освітня програма: «Комп'ютерна інженерія»

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри

доц. Т. ТЕРЛЕЦЬКИЙ

« 10 » 01 2025 р.

ЗАВДАННЯ  
НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ ЗДОБУВАЧУ ВИЩОЇ ОСВІТИ

*Лошику Дмитру Валерійовичу*

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема кваліфікаційної роботи Система контролю вологості складів підприємства  
деревоборки на базі мікроконтролера ESP-32

Керівник роботи к.т.н., доц. Христинець Наталія Анатоліївна

затверджені наказом закладу вищої освіти від «04» січня 2025 року № 11/01-02

2. Строк подання здобувачем вищої освіти кваліфікаційної роботи 10.06.2025р.

3. Вихідні дані до роботи джерелом розробки є науково-технічна література та  
публікації в періодичних виданнях з даного питання, опубліковані зарубіжні та вітчизняні  
роботи в даній області та різні інтернет-ресурси технічного спрямування.

4. Зміст пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити):

Аналітичний огляд систем контролю вологості у деревоборці

Проектування системи контролю вологості

Реалізація та перевірка працездатності системи

Висновки

5. Перелік графічного (ілюстративного) матеріалу:

## 6. Консультанти розділів роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис	
		завдання видав	завдання прийняв
<i>Аналітичний огляд систем контролю вологості у деревообробці</i>	<i>Христинець Н.А., доцент</i>		
<i>Проектування системи контролю вологості</i>	<i>Христинець Н.А., доцент</i>		
<i>Реалізація та перевірка працездатності системи</i>	<i>Христинець Н.А., доцент</i>		
<i>Нормоконтроль</i>	<i>Багнюк Н.В., доцент</i>		
<i>Гарант ОП</i>	<i>Лавренчук С.В., доцент</i>		
<i>Показник запозичень тексту</i>	_____ %		
<i>Академічна доброчесність</i>	<i>Міскевич О.І., ст. викладач</i>		

7. Дата видачі завдання 10.01.2025 р.

## КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів кваліфікаційної роботи	Строк виконання етапів роботи	Примітка
1.	<i>Аналітичний огляд систем контролю вологості у деревообробці</i>	до 10.02.2025 р.	Виконано
2.	<i>Проектування системи контролю вологості</i>	до 02.03.2025 р.	Виконано
3.	<i>Реалізація та перевірка працездатності системи</i>	до 02.04.2025 р.	Виконано
4.	<i>Висновки та пропозиції</i>	до 10.04.2025 р.	Виконано
5.	<i>Формування списку використаних джерел</i>	до 15.04.2025 р.	Виконано
6.	<i>Формування додатків</i>	до 02.05.2025 р.	Виконано
7.	<i>Оформлення ілюстративного матеріалу</i>	до 10.05.2025 р.	Виконано
8.	<i>Представлення остаточного варіанту кваліфікаційної роботи керівникові</i>	до 15.05.2025 р.	Виконано
9.	<i>Нормоконтроль</i>	до 30.05.2025 р.	Виконано
10.	<i>Інструментальна перевірка на академічний плагіат</i>	до 03.06.2025 р.	Виконано
11.	<i>Здача кваліфікаційної роботи та всіх супровідних документів на кафедрі</i>	до 10.06.2025 р.	Виконано

Здобувач вищої освіти

(підпис)

Лошик Д.В.

(прізвище, ініціали)

Керівник кваліфікаційної роботи

(підпис)

Христинець Н.А.

(прізвище, ініціали)

## АНОТАЦІЯ

Лошик Д. В. Система контролю вологості складів підприємства деревообробки на базі мікроконтролера ESP-32. Рукопис.

Кваліфікаційна робота бакалавра ОП «Комп'ютерна інженерія» спеціальності 123 Комп'ютерна інженерія. Луцький національний технічний університет. Луцьк, 2025.

Кваліфікаційна робота складається з вступу, трьох розділів, висновків, списку використаних джерел, додатків.

Перший розділ присвячено аналітичному огляду питань систем контролю вологості, тут обґрунтовано актуальність теми, розглянуто вплив вологості повітря на фізико-механічні властивості деревини, здійснено порівняльний аналіз технічних характеристик сучасних сенсорів і гігрометрів.

В другому розділі здійснено обґрунтування засобів розробки. Розглянуто схеми підключення апаратних компонентів та архітектуру системи, описано використане програмне забезпечення: логіку, протоколи, методи зберігання та передачі даних (ESP32, RGB-світлодіод KY-016, OLED-дисплей, сенсори SHT45). Розглянуто методику збору та опрацювання даних для оцінки працездатності системи.

Третій розділ присвячено монтажу системи на макетній платі, програмній реалізації усіх функціональних можливостей системи моніторингу та фактичній реалізації і тестуванню проекту.

Ключові слова: ESP, вологість деревини, мікроконтролерна система, датчики, збір даних, контроль даних, SHT45.

## ANNOTATION

Loshyk D. Humidity control system for warehouses of a woodworking enterprise based on the ESP-32 microcontroller. Manuscript.

Qualification work of the bachelor of the specialty «Computer Engineering» of the specialty 123 Computer Engineering. Lutsk National Technical University. Lutsk, 2025.

Qualification work consists of an introduction, three chapters, conclusions, a list of sources used, and appendices.

The first section is devoted to an analytical review of the issues of humidity control systems, the relevance of the topic is substantiated here, the influence of air humidity on the physical and mechanical properties of wood is considered, a comparative analysis of the technical characteristics of modern sensors and hygrometers is carried out.

The second section provides a justification of the development tools. The connection diagrams of the hardware components and the architecture of the system are considered, the software used is described: logic, protocols, methods of data storage and transmission (ESP32, RGB-LED KY-016, OLED-display, SHT45 sensors). The methodology for collecting and processing data to assess the system's performance is considered.

The third section is devoted to the installation of the system on a breadboard, the software implementation of all the functionality of the monitoring system, and the actual implementation and testing of the project.

Keywords: ESP, wood moisture, microcontroller system, sensors, data collection, data control, SHT45.

## ЗМІСТ

ВСТУП.....	7
РОЗДІЛ 1. АНАЛІТИЧНИЙ ОГЛЯД СИСТЕМ КОНТРОЛЮ ВОЛОГОСТІ У ДЕРЕВООБРОБЦІ.....	9
1.1 Умови зберігання деревини та вимоги до мікроклімату.....	9
1.2 Вплив вологості повітря на фізико-механічні властивості деревини.....	11
1.3 Існуючі засоби контролю вологості .....	13
1.4 Порівняльний аналіз технічних характеристик сучасних гігрометрів та сенсорів.....	19
РОЗДІЛ 2. ПРОЕКТУВАННЯ СИСТЕМИ КОНТРОЛЮ ВОЛОГОСТІ.....	24
2.1 Обґрунтування вибору мікроконтролера ESP-32 .....	24
2.2 Порівняння сенсорів вологості та обґрунтування вибору .....	26
2.3 Схема підключення апаратних компонентів та архітектура системи .....	28
2.4 Опис програмного забезпечення: логіка, протоколи, зберігання та передача даних .....	36
2.5 Методика збору та опрацювання даних .....	37
РОЗДІЛ 3. РЕАЛІЗАЦІЯ ТА ПЕРЕВІРКА ПРАЦЕЗДАТНОСТІ СИСТЕМИ....	40
3.1 Монтаж системи на макетній платі та налаштування з'єднань.....	40
3.2 Програмування ESP-32: зчитування даних, відправка на сервер, веб- інтерфейс .....	43
3.3 Реалізація оповіщення в системі .....	48
3.4 Аналіз точності, стабільності вимірювань та рекомендації щодо масштабування .....	51
ВИСНОВКИ .....	58
ПЕРЕЛІК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	60
ДОДАТКИ .....	61

## ВСТУП

Актуальність теми полягає в необхідності забезпечення ефективного контролю мікрокліматичних умов у складських приміщеннях деревообробних підприємств, зокрема рівня вологості повітря. Від цього показника безпосередньо залежить якість зберігання деревини, її подальша обробка, а також кінцева міцність і довговічність готової продукції. Традиційні методи контролю, такі як періодичні заміри ручними приладами, не забезпечують постійного моніторингу та часто супроводжуються людським фактором. Тому, впровадження автоматизованої системи на базі мікроконтролера ESP-32 дозволяє не лише підвищити точність вимірювань, але й оперативно реагувати на критичні зміни умов зберігання, що особливо важливо в умовах сучасного виробництва.

Метою роботи є розробка та впровадження автоматизованої системи контролю вологості складських приміщень деревообробного підприємства на базі мікроконтролера ESP-32, яка забезпечить безперервний моніторинг мікроклімату, оперативне виявлення відхилень та сприятиме збереженню якості деревини.

Об'єкт дослідження – процес контролю параметрів мікроклімату, зокрема вологості, у складських приміщеннях деревообробного підприємства.

Предметом дослідження є технічні засоби та програмні рішення для автоматизованого вимірювання та моніторингу вологості повітря на основі мікроконтролера ESP-32.

Для досягнення мети поставлено такі завдання:

- аналітично дослідити питання способів контролю вологості деревини, зокрема, ручні та побутові прилади і визначити оптимальні перспективні напрямки реалізації за допомогою технологій Інтернету речей;

- провести аналіз існуючих засобів вимірювання вологості, що використовуються на підприємствах деревообробки, з виявленням їхніх переваг, недоліків та причин, які спонукають до впровадження автоматизованої системи;

- розробити та запрограмувати систему контролю вологості повітря на базі мікроконтролера ESP-32 з використанням відповідних датчиків;

- провести експериментальне тестування розробленої системи в умовах складських приміщень підприємства з метою перевірки точності, стабільності та швидкодії роботи;

- дослідити графіки поведінки системи на веб-інтерфейсі та підтвердити працездатність розробки.

Новизна роботи полягає у створенні недорогої, енергоефективної та автономної системи контролю вологості на базі мікроконтролера ESP-32 з використанням високоточних цифрових датчиків, яка здатна в режимі реального часу здійснювати моніторинг мікроклімату складських приміщень. Система поєднує бездротову передачу даних, індикацію на OLED-дисплеї та звукову/світлову сигналізацію, що дозволяє оперативно реагувати на зміни умов зберігання деревини без залучення додаткових ручних вимірювань або складної інфраструктури.

Апробація результатів. Результати роботи представлені на III Міжнародній міждисциплінарній науково-практичній конференції «Актуальні питання, проблеми та перспективи розвитку науки і освіти», яка проходила з 24 по 26 квітня 2025 року у м.Київ [1] та представлені у додатку А кваліфікаційної роботи.

## РОЗДІЛ 1

### АНАЛІТИЧНИЙ ОГЛЯД СИСТЕМ КОНТРОЛЮ ВОЛОГОСТІ У ДЕРЕВООБРОБЦІ

#### 1.1 Умови зберігання деревини та вимоги до мікроклімату

Зберігання деревини є критично важливим етапом у деревообробній галузі, адже саме цей процес визначає, наскільки ефективно та якісно буде використано сировину на наступних етапах виробництва. Деревина, будучи природним гігроскопічним матеріалом, дуже чутливо реагує на зміну вологості та температури навколишнього середовища. Її структура здатна вбирати вологу з повітря або, навпаки, втрачати її, що в обох випадках може викликати деформації, тріщини, утрату міцності чи навіть ураження біологічними організмами, такими як пліснява або дерево-руйнівні гриби. Тому контроль мікрокліматичних умов у місцях зберігання деревини є не просто бажаним, а обов'язковим для забезпечення збереження її властивостей.

У сучасній деревообробній промисловості існує кілька підходів до зберігання деревини. Найпростішими є відкриті майданчики, які підходять лише для короткочасного зберігання кругляка або сирої деревини в теплу пору року. Вони практично не захищають матеріал від впливу опадів та різких перепадів температури, тому використовуються лише в екстрених або обмежених випадках. Дещо кращі умови забезпечують криті навіси, які частково оберігають деревину від дощу й снігу, але при цьому залишають її у вразливому положенні щодо коливань вологості повітря. Найбільш ефективними є закриті склади – будівлі з регульованою вентиляцією, в яких можна підтримувати стабільний мікроклімат, необхідний для довготривалого зберігання як сирої, так і вже висушеної деревини. Саме в таких приміщеннях можливо забезпечити контрольоване середовище, що позитивно впливає на якість кінцевої продукції.

Щоб забезпечити оптимальні умови для зберігання, потрібно дотримуватися конкретних параметрів температури та вологості. Для сирої деревини допустима відносна вологість повітря повинна становити приблизно

60-70 %, тоді як для технічно висушеної – не більше 45-55 %. Температурний режим має бути стабільним, бажано в межах від 10 до 25 градусів Цельсія. Різкі коливання температури можуть сприяти утворенню конденсату, що, у свою чергу, викликає зволоження деревини навіть у добре вентиляльованих приміщеннях. Надмірна вологість повітря призводить до набрякання, розбухання деревини, утворення плям, а також до значного ризику виникнення грибкових уражень. Водночас занадто сухе повітря викликає усадку, зниження щільності матеріалу, а в деяких випадках – ламкість і крихкість. Щоб уникнути цих явищ, важливо впроваджувати системи стабільної вентиляції, а також періодично перевіряти рівень вологи в повітрі та в самій деревині.

Особливу увагу слід приділяти породним особливостям деревини. Так, хвойні породи, зокрема сосна й ялина, краще переносять зміну умов навколишнього середовища, ніж листяні – наприклад, бук чи дуб. Останні мають складнішу пористу структуру, що сприяє швидкому вбиранню або віддачі вологи. Також варто враховувати й початковий стан деревини: свіжа, технічно висушена, камерно висушена або ж оброблена захисними речовинами. Для кожного з цих типів існують свої специфічні рекомендації щодо зберігання. Зокрема, технічно висушену деревину необхідно зберігати в умовах, максимально наближених до тих, у яких вона буде використовуватися – інакше можливі серйозні зміни її фізичних властивостей, що призводить до браку при подальшій обробці.

У зв'язку зі зростанням обсягів виробництва та потребою в довготривалому зберіганні деревини в стабільних умовах, дедалі більшої актуальності набувають автоматизовані системи моніторингу та контролю мікроклімату. Такі системи базуються на використанні цифрових сенсорів, мікроконтролерів та програмного забезпечення, що дозволяє відстежувати в режимі реального часу ключові параметри повітря – температуру, вологість, тиск тощо. Отримані дані можуть зберігатися в хмарних сервісах або локальних базах, використовуватися для аналізу динаміки змін і своєчасного реагування на небажані відхилення. Це відкриває нові можливості для впровадження

принципів розумного виробництва та оптимізації ресурсів. Впровадження подібних рішень дає змогу не лише зберегти якість деревини, а й підвищити економічну ефективність усього виробничого процесу.

## **1.2 Вплив вологості повітря на фізико-механічні властивості деревини**

Деревина, як природний матеріал рослинного походження, має унікальну властивість активно взаємодіяти з навколишнім середовищем, особливо з вологістю повітря. Цей матеріал є гігроскопічним, тобто здатним поглинати та віддавати вологу залежно від умов мікроклімату. Саме ця властивість робить деревину водночас цінною і вразливою у процесі її зберігання, транспортування та використання у виробництві.

Гігроскопічність деревини означає, що вона має велику кількість капілярів і порожнин, через які водяна пара легко проникає в її структуру. При підвищенні вологості повітря деревина вбирає вологу, а при зниженні – віддає її в навколишнє середовище. Волога проникає в клітинні стінки, змінюючи їхню товщину, і, відповідно, викликає фізичні зміни в розмірах деревини. Такі процеси є оборотними до певної межі, однак при частих і сильних коливаннях вологості структура деревини починає змінюватися незворотно.

Один з найпомітніших ефектів впливу вологості – це зміна розмірів деревини. Коли деревина поглинає вологу, вона розбухає, а при висиханні – стискається. Ці явища відомі як набухання та усушка. Якщо ці процеси відбуваються нерівномірно, з різною швидкістю в різних частинах заготовки, деревина починає викривлятися. Часто можна спостерігати жолоблення дощок, появу тріщин, особливо по торцях, або скручування вздовж волокон. Усе це значно ускладнює подальшу обробку деревини та погіршує її зовнішній вигляд і технічні характеристики.

Волога також істотно впливає на механічні властивості деревини. При надлишковій вологості знижується її щільність і міцність на стиск, згин і розтяг. Це пов'язано з тим, що клітинні стінки насичуються водою, стають м'якшими і

менш стійкими до механічних навантажень. У результаті деревина втрачає свою несучу здатність, що є критично важливим у будівельних та конструкційних застосуваннях. З іншого боку, надмірна сухість робить деревину крихкою: вона легше тріскається і ламка при згинанні чи ударі.

З часом, якщо умови вологості повітря залишаються нестабільними або шкідливими для деревини, починають проявлятися довгострокові негативні наслідки. Одним із найнебезпечніших факторів є біологічне ураження. Підвищена вологість створює ідеальне середовище для розвитку грибків, плісняви та мікроорганізмів, які не лише псують зовнішній вигляд деревини, а й руйнують її структуру зсередини. Ураження грибками може швидко поширюватися в умовах поганої вентиляції, знижуючи якість навіть висушеної деревини. У крайніх випадках така деревина стає непридатною для подальшого використання – як у будівництві, так і в меблевому виробництві чи інших галузях.

Ще один критичний наслідок – втрата експлуатаційної придатності матеріалу. Навіть без видимих пошкоджень, надмірна або нестабільна вологість здатна зруйнувати мікроструктуру деревини: змінюються зв'язки між клітинними елементами, знижується здатність витримувати навантаження, порушується однорідність матеріалу. Усі ці фактори призводять до того, що деревина перестає відповідати технічним характеристикам, необхідним для її безпечного та надійного застосування.

Варто також зазначити, що вплив вологості може відрізнятися залежно від породи деревини. Наприклад, листяні породи, особливо тверді (дуб, граб, бук), чутливіші до коливань вологості, ніж хвойні (сосна, ялина). Вони швидше реагують на зміни мікроклімату, що може бути перевагою або недоліком, залежно від умов експлуатації. Крім того, деревина, що пройшла правильну технічну сушку і була оброблена захисними складами, значно стійкіша до вологи, ніж необроблена або свіжа. Сушка не лише зменшує початкову вологість матеріалу, але й частково стабілізує його поведінку в змінних умовах.

Таким чином, з урахуванням усіх вищенаведених чинників, можна впевнено зробити висновок, що контроль вологості повітря в місцях зберігання деревини є не просто корисним, а життєво необхідним заходом. Регулярний моніторинг вологості дає змогу запобігти незворотнім пошкодженням деревини ще на етапі зберігання. У сучасних умовах, коли точність, надійність і ефективність виробництва є критично важливими, впровадження автоматизованих систем контролю мікроклімату стає логічним і економічно виправданим рішенням. Такі системи не лише забезпечують своєчасне виявлення відхилень від норми, але й дозволяють дистанційно керувати процесами зберігання, що значно знижує ризики псування матеріалу та втрати ресурсів.

### **1.3 Існуючі засоби контролю вологості**

У деревообробній промисловості контроль вологості – це не просто одна з вимог технічного процесу, а критичний фактор, що безпосередньо впливає на якість продукції, надійність конструкцій і тривалість експлуатації виробів з деревини. Оскільки деревина здатна активно вбирати й віддавати вологу з повітря, навіть незначні зміни мікроклімату можуть призвести до деформацій, тріщин, зміни розмірів або втрати міцності матеріалу. А в деяких випадках – навіть до появи грибків, плісняви чи біологічного руйнування.

Саме тому вимірювання вологості повітря та самої деревини є ключовим елементом системи якості зберігання та обробки. Без постійного моніторингу неможливо забезпечити стабільні умови, які б гарантували збереження фізико-механічних властивостей деревини. Підприємства, що серйозно ставляться до контролю вологості, значно рідше стикаються з браком, дефектами продукції та невиправданими фінансовими втратами.

Залежно від завдань, масштабу виробництва та фінансових можливостей, сьогодні доступні різноманітні засоби для вимірювання вологості – від простих

ручних приладів до сучасних цифрових систем, здатних автоматично реагувати на зміни умов.

### 1.3.1 Ручні прилади для вимірювання вологості

Ручні прилади для вимірювання вологості – це найпростіші та найдоступніші інструменти, які часто використовуються у деревообробці, особливо на початкових етапах сортування та приймання матеріалу. Найбільш поширеними є голчасті вологоміри, які працюють за принципом вимірювання електричного опору деревини між двома металевими щупами. У міру збільшення вологості опір матеріалу зменшується, що дозволяє приладу обчислити її приблизне значення. Приклади ручних засобів вимірювання вологості відображено на рисунку 1.1.



Рисунок 1.1 – Приклади ручних засобів вимірювання вологості

Такі пристрої зручні у використанні, не потребують спеціального налаштування і здатні швидко надати результат. Вони ідеально підходять для оперативної перевірки деревини прямо на складі або в процесі виробництва. Проте варто розуміти, що подібні прилади мають обмежену точність, особливо

коли йдеться про глибину проникнення щупів або неоднорідність структури деревини. У випадку твердої чи багатошарової деревини дані можуть виявитися неточними.

Ще один тип ручних приладів – це безконтактні (діелектричні) вологоміри, які працюють за принципом вимірювання змін діелектричної проникності матеріалу. Вони не потребують пошкодження зразка, що є великою перевагою, але також мають свої обмеження щодо точності та залежності від щільності деревини.

### 1.3.2 Побутові електронні вологоміри

Побутові електронні вологоміри (рисунок 1.2) є більш зручним і технологічно досконалим варіантом у порівнянні з ручними аналогами. Вони орієнтовані на користувачів, яким потрібна швидка, зручна та досить точна оцінка рівня вологості деревини в побутових або не виробничих умовах. Зазвичай такі прилади мають компактний корпус, цифровий дисплей і функціональність, що дозволяє легко зчитувати дані навіть користувачам без спеціальної підготовки.



Рисунок 1.2 – Приклади побутових вологомірів

Більшість побутових вологомірів працюють за електричним або ємнісним принципом: або через пряме занурення голчастих датчиків у деревину, або за допомогою безконтактного зондування. Такі пристрої часто мають попередньо встановлені режими для різних порід деревини, що дозволяє коректніше інтерпретувати вимірювання. Деякі моделі навіть здатні автоматично ідентифікувати тип матеріалу або попереджати про перевищення допустимого рівня вологості через звукові або візуальні сигнали.

Хоча точність таких приладів дещо нижча, ніж у професійного обладнання, вони залишаються дуже корисними для домашніх майстрів, працівників складів, дрібних виробників меблів та навіть для попередньої оцінки деревини перед ремонтом або будівництвом. Особливо вони зручні для регулярної перевірки умов зберігання без потреби в складному обслуговуванні або технічному супроводі.

Таким чином, побутові електронні прилади займають проміжну нішу між простими ручними засобами та повноцінними професійними системами моніторингу, забезпечуючи хороший баланс між ціною, функціональністю та зручністю використання.

### 1.3.3 Цифрові професійні системи вимірювання вологості

Цифрові професійні системи вимірювання вологості – це високоточні прилади та комплекси, що застосовуються у промислових умовах, лабораторіях, деревообробних комбінатах і будівельних компаніях. Основна відмінність таких систем – це їхня точність, надійність і здатність працювати в умовах високого навантаження та великого обсягу вимірювань.

До професійних цифрових пристроїв належать як переносні, так і стаціонарні прилади, які забезпечують вимірювання з точністю до 0,1-0,5 %. Часто вони мають розширені функції: можливість збереження результатів у пам'яті пристрою, передача даних на комп'ютер через USB або Bluetooth, вибір режимів для різних матеріалів, температурна компенсація, а також вбудована калібровка.

Деякі системи дозволяють здійснювати безперервний моніторинг вологості в приміщеннях зберігання або в самій деревині, якщо вона вже встановлена в конструкцію. Завдяки цьому можна контролювати мікроклімат у режимі реального часу і своєчасно реагувати на будь-які відхилення, які можуть загрожувати якості матеріалу. Приклади цифрових професійних систем вимірювання вологості зображено на рисунку 1.3.



Рисунок 1.3 – Приклади цифрових професійних систем вимірювання вологості

Такі пристрої є незамінними там, де від вологості залежать ключові технічні характеристики деревини – наприклад, у виробництві меблів, дерев'яного домобудівництва або під час сушіння пиломатеріалів. Висока вартість цифрових систем повністю виправдовується їхніми можливостями: це інвестиція в стабільну якість продукції та зниження втрат через псування деревини.

Одним із найперспективніших напрямів сучасного контролю вологості є використання технологій Інтернету речей IoT. У сфері моніторингу мікроклімату це поняття означає створення мережі пристроїв, які здатні автоматично

вимірювати вологість, передавати дані по мережі, аналізувати зміни й реагувати на них без участі людини. Це відкриває нові можливості для деревообробних підприємств, які зацікавлені у точному та стабільному зберіганні деревини.

#### 1.3.4 IoT-системи для вимірювання вологості

IoT-системи складаються з кількох основних елементів: сенсорів, що вимірюють вологість і температуру; мікроконтролерів, які обробляють дані та керують передачею; мережевих модулів для зв'язку з інтернетом або локальною мережею; а також програмного забезпечення для візуалізації інформації. Усе це може доповнюватися веб-інтерфейсом або мобільним додатком, через які користувачі бачать актуальні показники або отримують попередження про відхилення від норми.

Сьогодні існують як комерційні рішення, що працюють «з коробки», так і самостійно реалізовані проекти на основі популярних платформ, таких як ESP32 чи Arduino. Перші вирізняються зручністю і стильним дизайном, проте мають обмежені можливості для налаштування. Натомість саморобні системи на мікроконтролерах дозволяють повністю адаптувати логіку роботи під потреби підприємства, інтегрувати додаткові функції – наприклад, керування вентиляцією, надсилання SMS або логування змін вологості збереженням на сервері.

Однією з головних переваг таких рішень є дистанційний доступ. Це означає, що працівник може перебувати поза межами об'єкта, але все одно бачити стан повітря у складі на телефоні або комп'ютері. У разі перевищення порогу вологості система сама подасть сигнал тривоги, включить потрібне обладнання або сповістить відповідальних осіб. Це зменшує вплив людського фактора та дозволяє уникнути серйозних втрат через псування деревини.

Якщо порівнювати усі засоби контролю вологості, то традиційні ручні гігрометри сьогодні майже втратили свою актуальність у промисловості. Побутові електронні прилади хоч і точніші, але не забезпечують автоматизації. Професійні цифрові засоби більш надійні, але все ще потребують участі людини.

Натомість IoT-рішення вирізняються гнучкістю, точністю, автоматизацією й можливістю оперативного втручання.

У підсумку можна сказати, що сучасні цифрові технології, зокрема IoT, є найбільш доцільним вибором для підприємств, які прагнуть підвищити якість зберігання деревини, скоротити ризики псування та вивести процес контролю на новий рівень. Упровадження таких систем – це не лише крок до сучасності, а й стратегічне рішення, яке дозволяє зменшити витрати та покращити загальну ефективність виробництва.

#### **1.4 Порівняльний аналіз технічних характеристик сучасних гігрометрів та сенсорів**

У процесі моніторингу вологості повітря надзвичайно важливим є вибір приладу або сенсора, який не просто «показує цифру», а забезпечує надійне, точне й стабільне вимірювання в реальних умовах експлуатації. Для деревообробної галузі, де навіть незначне відхилення вологості може спричинити деформацію або втрату якості деревини, точність вимірювання має першочергове значення. Недостатньо знати лише сам факт наявності вологості – важливо розуміти її кількісні параметри з мінімальною похибкою.

Технічні характеристики сенсорів і гігрометрів, такі як точність, діапазон вимірювання, стабільність калібрування, час відгуку, чутливість до змін середовища, енергоспоживання та спосіб підключення, визначають, наскільки ефективно пристрій буде працювати у конкретних умовах – чи то на відкритому складі, чи в закритому сховищі з контрольованим мікрокліматом.

Неправильно обраний або дешевий прилад може створити ілюзію контролю, хоча насправді буде давати спотворені дані, що призведе до прийняття неправильних рішень. Саме тому перед вибором пристрою для вимірювання вологості важливо розуміти його можливості, обмеження та відповідність до конкретних виробничих завдань.

У сучасних умовах, коли контроль мікроклімату має вирішальне значення в багатьох сферах – від зберігання деревини до побутового комфорту, – ринок пропонує широкий спектр засобів для вимірювання вологості. Ці пристрої можна умовно поділити на три основні категорії: професійні цифрові гігрометри, побутові електронні прилади та цифрові сенсори для вбудованих IoT-систем. Розглянемо окремі приклади кожної групи детальніше, з акцентом на їхні характеристики, переваги та можливі сфери застосування.

Серед професійних приладів одне з провідних місць займає Testo 605-N1 (рисунок 1.4) – компактний термогігрометр, що дозволяє точно вимірювати температуру та вологість повітря. Завдяки обертовому зонду він зручний для вимірювань у вентиляційних каналах, складських приміщеннях та інших важкодоступних зонах. Його також використовують для оцінки точки роси – важливого параметра при зберіганні гігроскопічних матеріалів.



Рисунок 1.4 – Професійний термогігрометр Testo 605-N1 [2]

Іншим представником професійного класу є Trotec T660 – пристрій, що використовує мікрохвильовий метод для безконтактного вимірювання вологості на глибину до 40 мм. Це особливо важливо при оцінці вологого стану деревини, яка вже оброблена або вмонтована в конструкції. Завдяки сенсорному екрану та підтримці таких функцій, як мінімум, максимум, утримання та усереднення

показів, цей пристрій дає змогу здійснювати глибокий аналіз і зберігати стабільність вимірювань. Даний прилад зображено на рисунку 1.5.



Рисунок 1.5 – Діелектричний вологомір Trotec T660 [3]

У побутовому сегменті особливо популярним став Xiaomi Miija Bluetooth Thermometer 2 (рисунок 1.6). Компактний пристрій оснащений зручним LCD-дисплеєм та підтримує Bluetooth-передачу даних. Це дозволяє в реальному часі відстежувати показники через мобільний додаток. Він має привабливий дизайн і добре підходить для використання в житлових та офісних приміщеннях.



Рисунок 1.6 – Термометр-гігрометр Xiaomi Miija Bluetooth Thermometer 2 [4]

Аналогічним побутовим рішенням є ThermoPro TP50 (рисунок 1.7) – доступний і простий цифровий гігromетр із точністю  $\pm 2\%$  у діапазоні 30-80 % відносної вологості. Його великі цифри на екрані легко зчитуються навіть з відстані, а регулярне оновлення даних кожні 10 секунд дозволяє мати актуальну інформацію щодо умов у приміщенні.



Рисунок 1.7 – Цифровий кліматичний термогігromетр ThermoPro TP-50 [5]

Окрему категорію складають цифрові сенсори для IoT-систем, які легко інтегруються в автоматизовані рішення. Серед них DHT22 (рисунок 1.8) – один із найпоширеніших сенсорів у DIY-середовищі. Він підтримує повний діапазон вологості (0-100 % RH) з точністю  $\pm 2\%$ , що робить його достатньо надійним для базових систем моніторингу.



Рисунок 1.8 – Термометр і гігromетр DHT22 [6]



## РОЗДІЛ 2

### ПРОЕКТУВАННЯ СИСТЕМИ КОНТРОЛЮ ВОЛОГОСТІ

#### 2.1 Обґрунтування вибору мікроконтролера ESP-32

Проектування сучасної автоматизованої системи контролю вологості передбачає використання мікроконтролера як центрального елементу обробки даних та управління. Вибір відповідного мікроконтролера значною мірою впливає на функціональність, надійність, точність та масштабованість усієї системи. Тому до нього висувається низка обґрунтованих технічних вимог.

Перш за все, мікроконтролер має підтримувати цифрові інтерфейси, сумісні з сучасними датчиками температури та вологості, зокрема такими як I<sup>2</sup>C та SPI. Це дозволяє легко підключати сенсори (наприклад, SHT4x, BME280) без складних схем узгодження сигналів.

Другим важливим критерієм є наявність можливості бездротової передачі даних. В умовах, коли система контролю повинна функціонувати у віддалених або розподілених об'єктах (наприклад, на складах або у виробничих приміщеннях), підтримка Wi-Fi, або Bluetooth є надзвичайно актуальною. Це дозволяє реалізувати дистанційний моніторинг, збирання статистики та формування звітів без необхідності фізичного доступу до пристрою.

Крім того, мікроконтролер має бути достатньо продуктивним для виконання не лише базової обробки сигналів, а й обслуговування веб-інтерфейсів, локального зберігання даних та, за потреби, обчислювальних алгоритмів (наприклад, фільтрації, прогнозування тощо). У цьому контексті важливим є також обсяг доступної пам'яті (як оперативної, так і програмної).

Ще одним важливим аспектом є енергоефективність. Якщо система працює в умовах обмеженого живлення або на акумуляторі, низьке енергоспоживання мікроконтролера дозволяє продовжити автономну роботу без необхідності частого заміни джерел живлення.

Нарешті, важливою вимогою є зручність програмування, наявність стабільного середовища розробки, велика спільнота та наявність прикладів

застосування. Це значно полегшує як початкову розробку, так і подальше розширення або модифікацію системи.

Одним із найпопулярніших мікроконтролерів на ринку програмістів є мікроконтролер ESP-32 (рисунок 2.1). Цей мікроконтролер розроблений компанією Espressif Systems, є потужним та універсальним рішенням для побудови IoT-систем і систем моніторингу навколишнього середовища. Його технічні характеристики роблять його надзвичайно привабливим варіантом для реалізації автоматизованого контролю вологості на підприємствах, зокрема у деревообробній промисловості.



Рисунок 2.1 – Мікроконтролер ESP-32 [8]

ESP-32 побудований на основі двоядерного процесора Tensilica LX6 з тактовою частотою до 240 МГц, що забезпечує високу продуктивність при обробці даних від сенсорів і реалізації мережевих функцій. Вбудована оперативна пам'ять обсягом до 520 КБ і підтримка зовнішньої Flash-пам'яті дають змогу зберігати як програмний код, так і тимчасові дані.

Однією з ключових переваг ESP-32 є наявність вбудованих модулів Wi-Fi (802.11 b/g/n) та Bluetooth (Classic і BLE), що дозволяє реалізувати бездротовий зв'язок без використання зовнішніх модулів. Це суттєво знижує вартість проєкту та спрощує апаратну реалізацію.

Мікроконтролер підтримує численні інтерфейси введення/виведення, зокрема ІС, SPI, UART, ADC, DAC, PWM, які забезпечують широкі можливості підключення цифрових і аналогових датчиків. Це дозволяє легко інтегрувати в систему різноманітні сенсори вологості, температури, газу та інші виконавчі елементи – зокрема, дисплеї, бузери, реле тощо.

Ще однією перевагою ESP-32 є його підтримка енергоефективних режимів роботи, включаючи глибокий сон (deep sleep), що дозволяє зменшити енергоспоживання в автономних системах. У випадках, коли система живиться від акумулятора або сонячної батареї, ця функціональність є критично важливою.

ESP-32 має розвинену екосистему підтримки: для нього існує велика кількість бібліотек, документації, прикладів та відкритого коду. Програмування можливе як через Arduino IDE, так і за допомогою більш професійного середовища ESP-IDF, що відкриває доступ до низькорівневого управління пристроєм.

Загалом, ESP-32 є ідеальним вибором для побудови системи моніторингу вологості, оскільки поєднує в собі продуктивність, мережеві можливості, гнучкість підключення та енергоефективність у компактному й доступному пристрої.

## **2.2 Порівняння сенсорів вологості та обґрунтування вибору**

Правильний вибір сенсора вологості є критичним чинником для забезпечення надійної роботи всієї системи контролю мікроклімату. На ринку представлено широкий спектр сенсорів, однак не всі з них забезпечують достатню точність, стабільність, енергоефективність та зручність інтеграції. У цьому проєкті було розглянуто три найпоширеніші моделі: DHT22, BME280 та SHT45.

DHT22 – це один із найпопулярніших цифрових датчиків, який використовується в простих DIY-проєктах. Він має точність вимірювання

вологості  $\pm 2\%$  RH у діапазоні від  $0\%$  до  $100\%$  RH та температуру від  $-40$  до  $+80^\circ\text{C}$  з точністю  $\pm 0.5^\circ\text{C}$ . Попри це, він має низьку частоту оновлення даних (до  $0.5$  Гц) і схильність до деградації в умовах високої вологості або пилу. Також він не підтримує стандартні шини зв'язку (I2C або SPI), а передає дані через повільний однопровідний протокол, що ускладнює масштабування та інтеграцію в більш складні системи. Зовнішній вигляд датчика відображено на рисунку 2.2.

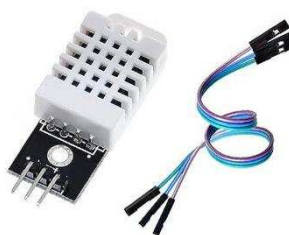


Рисунок 2.2 – Датчик температури та вологості DHT22 [9]

BME280 (рисунок 2.3) – багатофункціональний сенсор, який крім вологості й температури також вимірює атмосферний тиск. Він підтримує інтерфейси I2C та SPI, забезпечуючи гнучкість у підключенні. Точність вологості становить  $\pm 3\%$  RH, що цілком прийнятно для загального використання, однак у порівнянні з іншими сенсорами його похибка вища. BME280 є хорошим вибором для кліматичних станцій або загальних систем моніторингу, але для точного контролю складу з деревиною цього рівня може бути недостатньо.



Рисунок 2.3 – Багатофункціональний сенсор BME280 [10]

SHT45 (рисунок 2.4) від компанії Sensirion – найновіший і найточніший сенсор з усіх трьох. Він має абсолютну похибку вимірювання вологості всього  $\pm 1\%$  RH і температури  $\pm 0.1\text{ }^{\circ}\text{C}$ , що робить його ідеальним для професійних застосувань. Крім того, він має низьке енергоспоживання, вбудовану цифрову калібровку, інтерфейс I<sup>2</sup>C та високий рівень стабільності показів навіть у складних умовах експлуатації. Його компактні розміри дозволяють легко вбудовувати сенсор у мікросистеми, а підтримка швидких оновлень даних (до 1 Гц) робить його надійним для динамічного моніторингу.



Рисунок 2.4 – Датчик вимірювання температури та вологості SHT45

З огляду на технічні параметри та потреби проєкту, найкращим вибором є сенсор SHT45. Він забезпечує поєднання високої точності, енергоефективності, стабільності та простоти інтеграції з мікроконтролером ESP-32. Це дозволяє реалізувати ефективну систему моніторингу вологості, здатну працювати в умовах складу з високими вимогами до мікроклімату.

### **2.3 Призначення та схема підключення апаратних компонентів**

У процесі розробки системи контролю вологості повітря планується використання ряду апаратних компонентів, кожен з яких відіграватиме важливу роль у забезпеченні точності, надійності та ефективності роботи всієї конструкції. Центральним елементом системи стане мікроконтролер ESP32,

який, завдяки високій обчислювальній потужності та вбудованому Wi-Fi-модулю, дозволить організувати як локальне керування, так і передачу даних у хмарні або локальні веб-інтерфейси.

Для вимірювання параметрів мікроклімату передбачено використання цифрового сенсора температури та вологості SHT45. Цей сенсор характеризується високою точністю, стабільністю калібрування та підтримкою інтерфейсу I2C, що дозволяє зменшити кількість необхідних з'єднань і спростити монтаж. Його вибір обґрунтовується потребою у достовірних показниках вологості, особливо важливих для приміщень деревообробної промисловості.

Передбачається також інтеграція OLED-дисплея з діагоналлю 0.91 дюйма та роздільною здатністю 128x32 пікселів. Він служитиме для виведення актуальних даних вимірювань без необхідності додаткових пристроїв виводу. Завдяки підтримці I2C-протоколу дисплей буде зручно підключити до тієї ж шини, що й сенсор, що оптимізує використання виводів ESP32.

Візуальну індикацію стану середовища передбачається реалізувати за допомогою RGB-світлодіода KY-016, який буде змінювати кольори в залежності від рівня вологості або температури. Для подачі звукових попереджень у разі виявлення критичних умов у системі планується використання активного бузера з низьким рівнем спрацювання.

Збирання всієї системи передбачено здійснити на макетній платі на 400 точок. Такий підхід дозволить легко модифікувати схему в процесі налагодження, проводити експерименти та перевірку працездатності без потреби у паянні. У разі потреби тестування додаткових конфігурацій або розширення функціоналу може бути підключена додаткова макетна плата на 830 точок.

Головний компонент у системі мікроконтролер ESP32 (рисунок 2.5) – це керуючий елемент, що відповідає за збір даних із сенсора вологості, обробку отриманої інформації, управління індикацією (RGB-світлодіод та OLED-дисплей), а також за передачу даних через вбудований Wi-Fi-модуль. Завдяки

підтримці інтерфейсів UART, I<sup>2</sup>C та SPI, ESP32 дозволяє ефективно підключати периферійні модулі з мінімальним використанням виводів.



Рисунок 2.5 – Мікроконтролер ESP32

Цифровий сенсор температури та вологості SHT45 (рисунок 2.6) використовується для безперервного моніторингу кліматичних параметрів. Він підключається до ESP32 через I<sup>2</sup>C-шину (SDA, SCL) і передає дані з високою точністю:  $\pm 1.8\%$  RH для вологості та  $\pm 0.1\text{ }^{\circ}\text{C}$  для температури. Низьке енергоспоживання сенсора дозволяє його використання навіть у системах з автономним живленням.

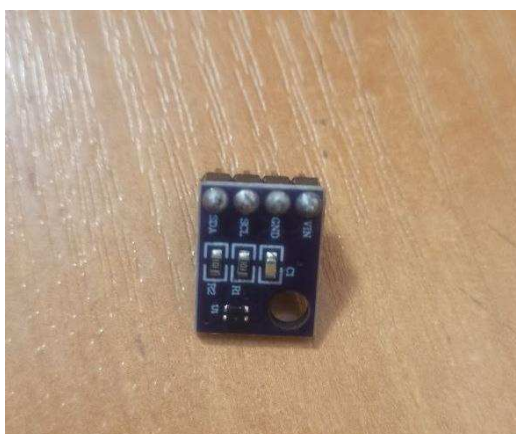


Рисунок 2.6 – Сенсор температури та вологості SHT45

OLED-дисплей 0.91D I<sup>2</sup>C 128x32 використовується для локального виводу даних про стан мікроклімату. Вивід інформації на дисплей реалізується через той

самий I<sup>2</sup>C-інтерфейс, що й сенсор, завдяки чому зменшується кількість необхідних з'єднань. На екрані передбачається виводити поточну температуру, вологість та можливо – піктограми тривоги при критичних значеннях. Дисплей зображено на рисунку 2.7.

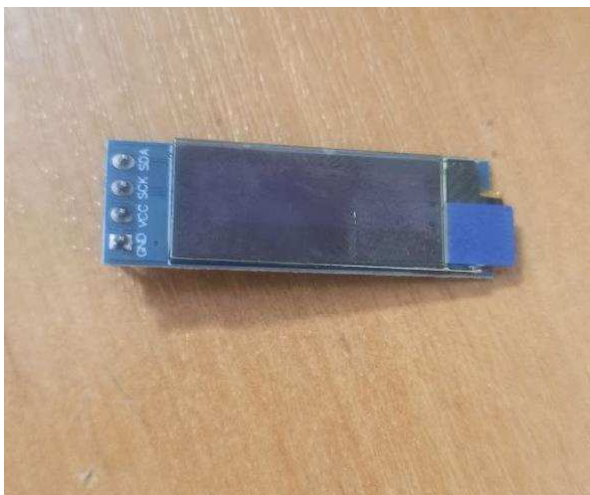


Рисунок 2.7 – OLED-дисплей 0.91” I<sup>2</sup>C 128x32

RGB-світлодіод (KY-016) (рисунок 2.8) – індикатор візуального попередження. Модуль має три керуючі входи (Red, Green, Blue), які підключаються до цифрових виводів ESP32 через резистори. Колір світіння відображає стан системи: наприклад, зелений – норма, жовтий – близько до критичних значень, червоний – перевищення допустимого порогу вологості.

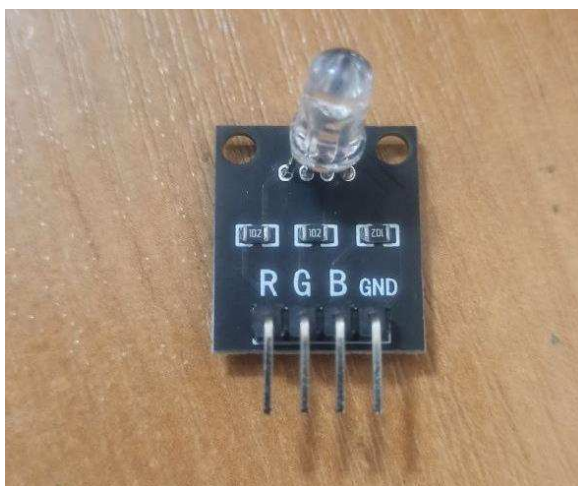


Рисунок 2.8 – RGB-світлодіод (KY-016)

Звуковий модуль (активний бузер) забезпечить звукову сигналізацію у випадку, коли значення вологості виходитимуть за допустимі межі. Підключення здійснюється до цифрового виходу ESP32 із низьким рівнем тригера. Планується, що бузер буде активуватись короткочасно при переході через встановлений поріг, щоб не створювати постійного шуму. Звуковий бузер зображено на рисунку 2.9.

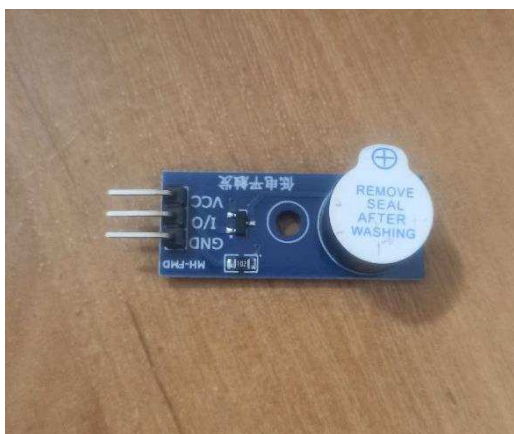


Рисунок 2.9 – Звуковий модуль для оповіщення в системі

Макетна плата на 400 точок (рисунок 2.10) слугуватиме основою для фізичного монтажу всіх компонентів. Вона дозволить швидко створити прототип без паяння, змінювати компонування, протестувати різні конфігурації підключення.

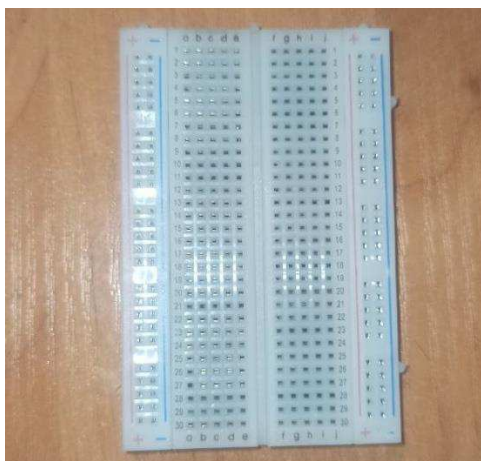


Рисунок 2.10 – Макетна плата на 400 точок

Провідники (Dupont) – використовуються для з'єднання компонентів між собою, зокрема між ESP32 і периферійними модулями. Планується використання кольорових проводів для зручності при відлагодженні та уникнення помилок. Приклад таких провідників зображено на рисунку 2.11.



Рисунок 2.11 – З'єднувальні провідники (Dupont) для роботи на макетній платі

Для зручності та розширення можливостей мікроконтролеру корисним є використання плати розширення ESP-32. Зовнішній вигляд плати розширення відображено на рисунку 2.12.



Рисунок 2.12 – Плата розширення для ESP-32

Схема підключення апаратних компонентів системи контролю вологості розроблена таким чином, щоб забезпечити ефективну взаємодію між усіма модулями та максимально зручно реалізувати логіку керування системою за допомогою мікроконтролера ESP32. На основі представленої графічної схеми (рисунок 2.13) розглянемо принцип підключення основних вузлів.

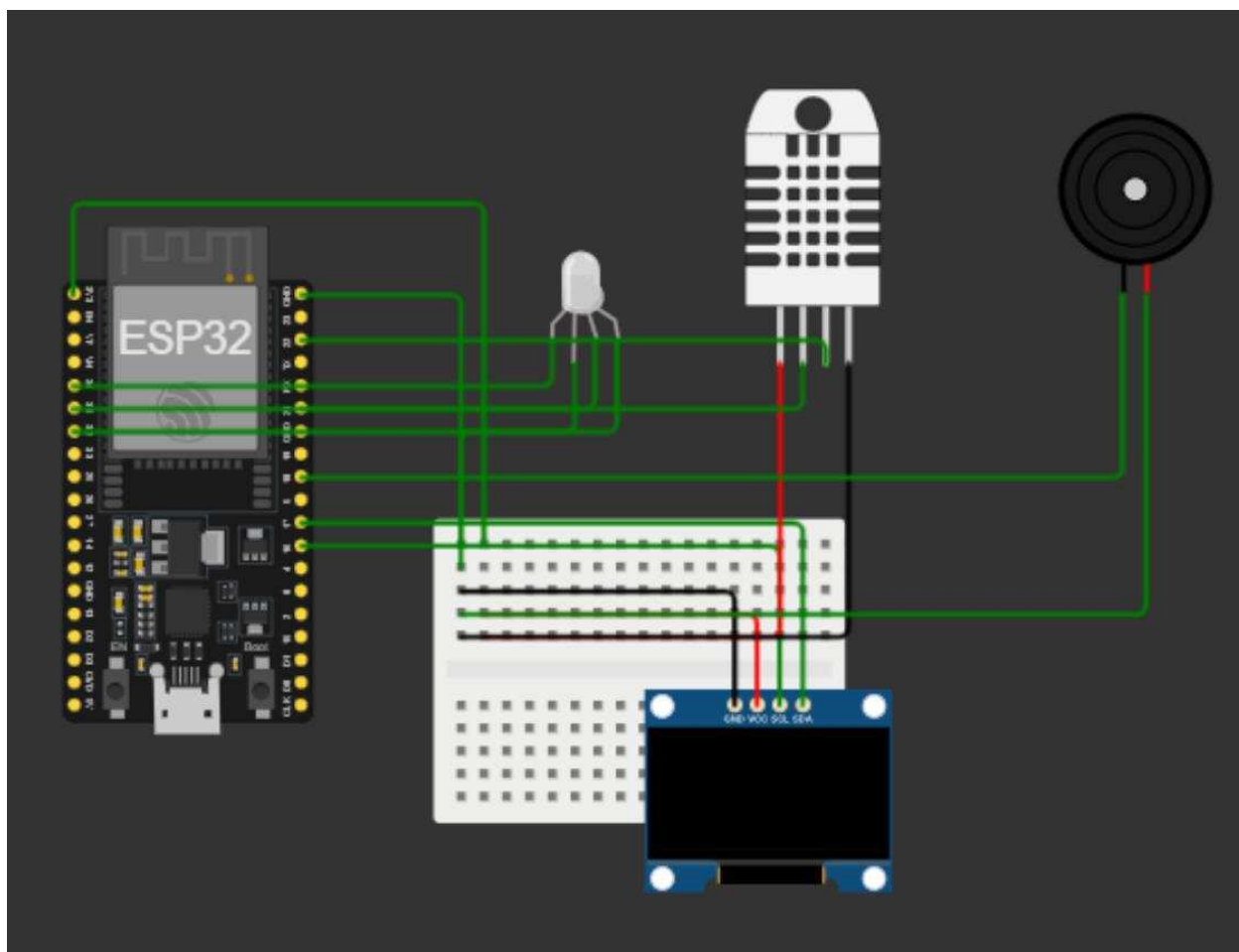


Рисунок 2.13 – Схема підключення апаратних компонентів системи контролю вологості на базі ESP32

Мікроконтролер ESP32 є центральною частиною всієї системи, до якої підключаються всі інші компоненти. Живлення всіх модулів подається від ESP32: VCC (3.3 В) та GND використовуються для сенсора SHT45, дисплея OLED та RGB-світлодіода. Завдяки використанню інтерфейсу I<sup>2</sup>C (лінії SDA та SCL), сенсор температури і вологості SHT45 та OLED-дисплей можуть бути підключені паралельно до відповідних виводів ESP32 – SDA (GPIO21) та SCL

(GPIO22). Це дозволяє зекономити кількість виводів і забезпечує просте та надійне з'єднання [11].

RGB-світлодіод KY-016 підключається до трьох цифрових виходів ESP32, кожен з яких відповідає за окремий колір – червоний, зелений та синій. Через обмеження по струму, планується використовувати резистори перед кожною з ліній керування, що дозволить уникнути пошкодження світлодіода та самого контролера. Залежно від показників вологості або температури ESP32 змінюватиме яскравість і колір світлодіода відповідно до закладеної логіки сигналізації.

Звуковий модуль (активний буюер) підключається до одного з цифрових виходів ESP32. Перевагою активного буюера є те, що для його активації достатньо подати сигнал логічного рівня, не потрібно генерувати частоту на контролері. Заплановано використовувати низькорівневий тригер, тобто буюер буде вмикатись при подачі логічного нуля. Буюер буде сигналізувати про вихід вологості за встановлені порогові значення короткими імпульсами, щоб не створювати надмірного шуму.

OLED-дисплей розташовується окремо, але також підключається до I<sup>2</sup>C-шини, вже використаної для сенсора вологості. Перевага такого підключення полягає у зменшенні кількості необхідних ліній передачі даних та уніфікації протоколу взаємодії з ESP32. На дисплеї виводитиметься поточне значення температури та вологості, а також інші текстові або графічні повідомлення системи.

Усі з'єднання планується реалізувати на макетній платі на 400 точок, що дозволить легко змінювати компонування та проводити налагодження. Підключення елементів до макетної плати здійснюється за допомогою Dupont-провідників [12], що дозволяє швидко та зручно організувати всі з'єднання без використання пайки.

Таким чином, схема побудована з урахуванням модульності, простоти реалізації та можливості подальшого розширення системи. Всі компоненти

взаємодіють між собою через надійні інтерфейси, що забезпечить стабільну роботу системи у процесі експлуатації.

## **2.4 Опис програмного забезпечення: логіка, протоколи, зберігання та передача даних**

Програмне забезпечення системи контролю вологості складів підприємства деревообробки передбачає реалізацію вбудованої логіки, яка забезпечуватиме безперервний моніторинг параметрів навколишнього середовища, обробку отриманих даних, їхню візуалізацію, сигналізацію у разі перевищення допустимих значень, а також доступ до даних через веб-інтерфейс.

Основою логіки роботи є періодичне зчитування показників температури та вологості з цифрового сенсора, обробка цих даних у реальному часі та ухвалення рішення про спрацювання візуальної та звукової сигналізації у разі, якщо значення виходять за межі встановлених порогів. Окремо передбачено відображення поточних параметрів на OLED-дисплеї, що дозволяє здійснювати локальний моніторинг прямо на місці встановлення системи.

Для передачі даних використовується вбудований модуль Wi-Fi мікроконтролера, що дозволяє реалізувати функцію веб-сервера. Це забезпечить можливість перегляду параметрів з будь-якого пристрою, підключеного до локальної мережі. Запити клієнтів обробляються в залежності від їхнього типу – або видається інтерактивна HTML-сторінка з графіками, або JSON-дані для подальшого машинного аналізу чи візуалізації.

Передача даних між сенсором та мікроконтролером відбуватиметься за протоколом I2C. Зберігання історичних даних у цій версії системи не передбачено, однак у майбутньому можлива реалізація буфера або підключення до віддаленого сервера чи бази даних для ведення журналу змін та статистики.

Загалом програмна логіка розробляється таким чином, щоб забезпечити надійність, автономність і зручність використання системи як для локального,

так і для віддаленого моніторингу мікрокліматичних умов у складських приміщеннях.

## **2.5 Методика збору та опрацювання даних**

Для забезпечення надійної роботи системи моніторингу вологості складів необхідно провести оцінку її працездатності. Основною метою є перевірка здатності системи точно фіксувати зміни температури та вологості, коректно обробляти дані, своєчасно реагувати на критичні ситуації та стабільно передавати інформацію до інтерфейсу користувача. Також важливо оцінити загальну ефективність функціонування системи в умовах, наближених до реальних, для виявлення можливих технічних або програмних недоліків.

Перед початком збору даних необхідно підготувати систему до роботи. Для цього виконується базове налагодження програмного забезпечення, перевіряється справність підключення всіх модулів: сенсора температури й вологості, OLED-дисплея, бузера, а також забезпечується стабільне живлення ESP32. Умови тестування мають передбачати зміну рівня вологості повітря, що дозволить перевірити реакцію системи на різні ситуації. Після увімкнення мікроконтролера проводиться початкове калібрування сенсора та фіксація базових параметрів середовища.

Збір інформації здійснюється шляхом безперервного зчитування даних із цифрового сенсора з заданим інтервалом часу. Всі отримані показники виводяться на OLED-дисплей для локального контролю, а також передаються через вбудований веб-інтерфейс по Wi-Fi для дистанційного моніторингу. Під час тестування здійснюється ручне фіксування моментів спрацювання звукової сигналізації, якщо зафіксовано перевищення допустимого рівня вологості. Зібрані дані надалі використовуються для аналізу точності, надійності та швидкодії всієї системи.

Для забезпечення надійної роботи системи моніторингу вологості складів необхідно провести оцінку її працездатності [13]. Основною метою є перевірка

здатності системи точно фіксувати зміни температури та вологості, коректно обробляти дані, своєчасно реагувати на критичні ситуації та стабільно передавати інформацію до інтерфейсу користувача. Також важливо оцінити загальну ефективність функціонування системи в умовах, наближених до реальних, для виявлення можливих технічних або програмних недоліків.

Перед початком збору даних необхідно підготувати систему до роботи. Для цього виконується базове налагодження програмного забезпечення, перевіряється справність підключення всіх модулів: сенсора температури й вологості, OLED-дисплея, бузера, а також забезпечується стабільне живлення ESP32. Умови тестування мають передбачати зміну рівня вологості повітря, що дозволить перевірити реакцію системи на різні ситуації. Після увімкнення мікроконтролера проводиться початкове калібрування сенсора та фіксація базових параметрів середовища.

Збір інформації здійснюється шляхом безперервного зчитування даних із цифрового сенсора з заданим інтервалом часу. Всі отримані показники виводяться на OLED-дисплей для локального контролю, а також передаються через вбудований веб-інтерфейс по Wi-Fi для дистанційного моніторингу. Під час тестування здійснюється ручне фіксування моментів спрацювання звукової сигналізації, якщо зафіксовано перевищення допустимого рівня вологості. Зібрані дані надалі використовуються для аналізу точності, надійності та швидкодії всієї системи.

Проведення методики збору та опрацювання даних є ключовим етапом у процесі оцінки працездатності системи моніторингу вологості складів. Завдяки визначеним критеріям ефективності, правильно підібраним інструментам аналізу та налаштованому механізму фіксації показників стало можливим виявити потенційні недоліки в роботі апаратної та програмної частин.

Запропонована методика дає змогу контролювати стабільність роботи пристроїв у режимі реального часу, аналізувати динаміку змін вологості й температури, а також оперативно реагувати на критичні зміни параметрів. Таким

чином, забезпечується цілісна перевірка здатності системи ефективно працювати в умовах, наближених до експлуатаційних.

## РОЗДІЛ 3

### РЕАЛІЗАЦІЯ ТА ПЕРЕВІРКА ПРАЦЕЗДАТНОСТІ СИСТЕМИ

#### 3.1 Монтаж системи на макетній платі та налаштування з'єднань

Монтаж системи моніторингу вологості складів здійснювався поетапно, із забезпеченням правильного підключення усіх компонентів до мікроконтролера ESP32 на базі макетної плати. Всі етапи збирання були задокументовані на відповідних рисунках, що дозволяє наочно продемонструвати логіку побудови схеми.

Першим кроком стало встановлення мікроконтролера ESP32 у спеціальну плату розширення (рисунок 3.1), що значно спрощує подальше підключення до макетної плати. Такий підхід дозволяє стабільно зафіксувати контролер і забезпечити зручний доступ до його виводів для монтажу проводів.

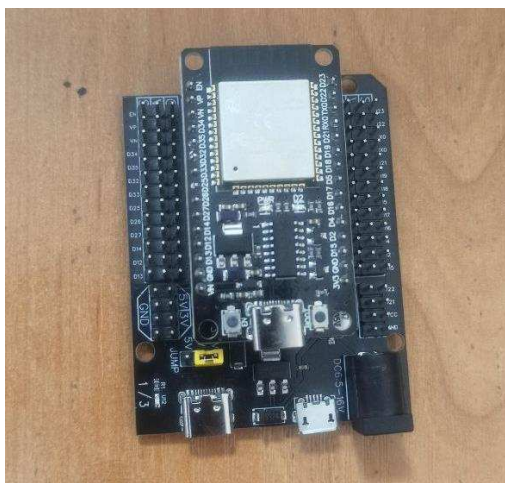


Рисунок 3.1 – Підключення мікроконтролера ESP-32 до плати розширення

Наступним етапом було підключення живлення від мікроконтролера до макетної плати. Для цього було з'єднано відповідні пінові контакти з лініями живлення макетної плати: позитивна шина (VCC) підключена до червоної лінії, а земля (GND) – до синьої. Це дозволило створити єдину систему живлення для всіх підключених модулів. Даний етап відображено на рисунку 3.2.

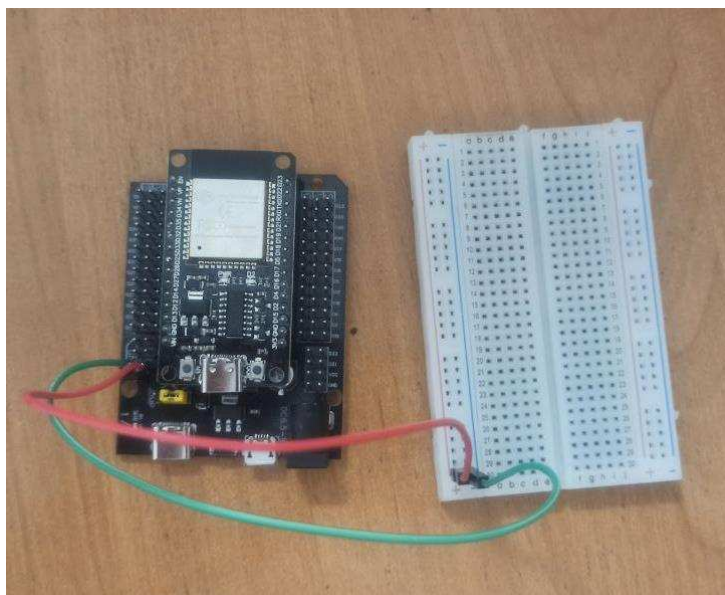


Рисунок 3.2 – Підключення живлення від мікроконтролера до макетної плати

Далі здійснювалося підключення цифрового датчика температури та вологості (SHT4x). Його живлення було подане до шин живлення макетної плати: контакт VCC до червоної лінії, GND – до синьої. Передача даних відбувається через інтерфейс I2C, тому лінія SDA була підключена до порту D21, а лінія SCL – до D22 мікроконтролера (рис. 3.3).

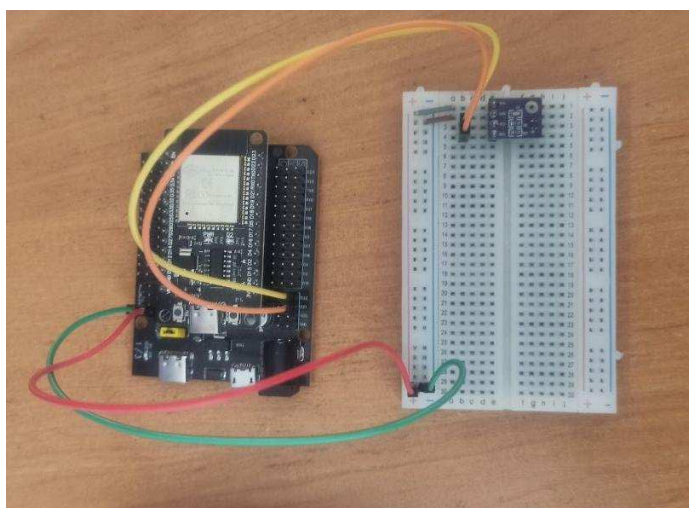


Рисунок 3.3 – Підключення цифрового датчика температури та вологості SHT45

Наступним підключенням став OLED-дисплей з інтерфейсом I2C (рисунок 3.4), що забезпечує виведення актуальної інформації про стан середовища. Живлення дисплея також подавалося до загальних ліній живлення на макетній платі. Для передачі даних SDA дисплея було з'єднано з виводом D16, а SCL – з D17 ESP32.

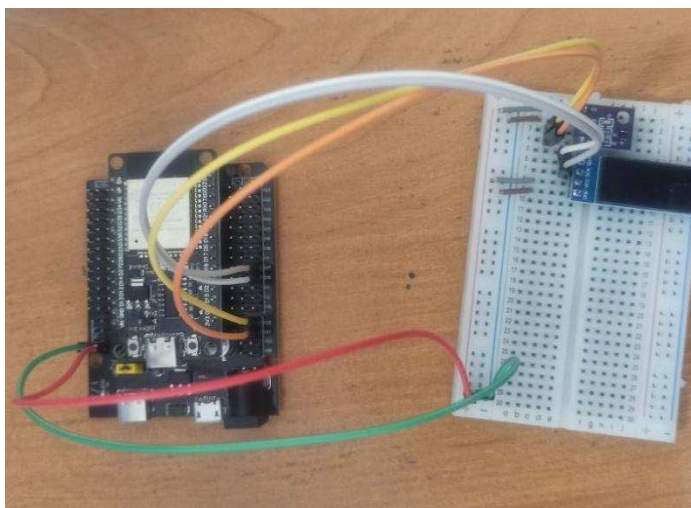


Рисунок 3.4 – Підключення OLED-дисплею з інтерфейсом I2C

Для звукового сповіщення було використано активний бужер, який підключається через три контакти. Живлення подається з ліній макетної плати: VCC – до червоної лінії, GND – до синьої. Керувальний вивід підключено до цифрового порту D32 мікроконтролера (рисунок 3.5).

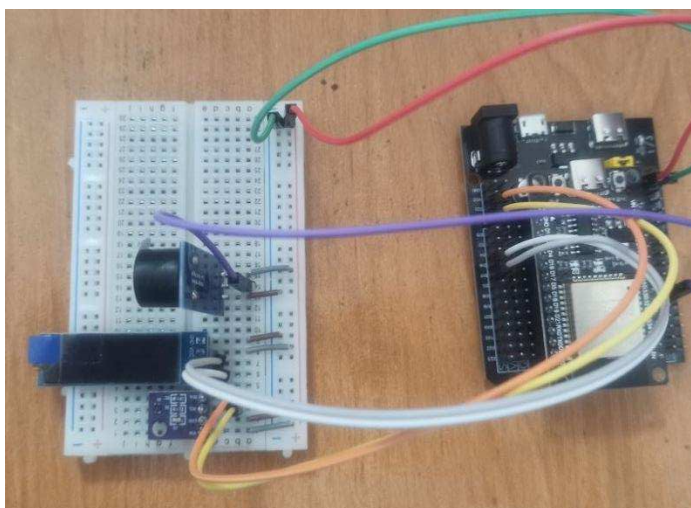


Рисунок 3.5 – Підключення бузера до системи

Завершальним етапом було підключення RGB-світлодіода (рисунок 3.6), який дозволяє візуально сигналізувати про зміну параметрів середовища. Його катод (GND) підключено до синьої лінії макетної плати, а керувальні виводи для каналів червоного, зеленого та синього кольорів – відповідно до портів D33, D25 та D26 мікроконтролера ESP32.

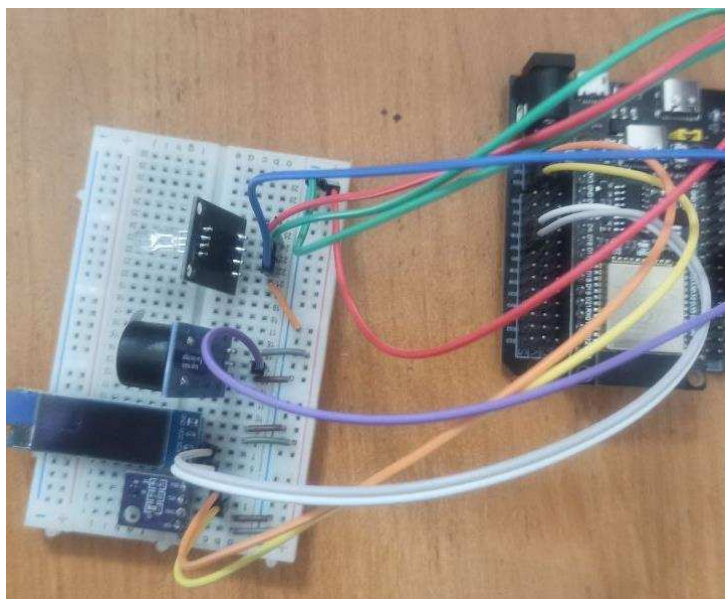


Рисунок 3.6 – Підключення RGB-світлодіода

Усі з'єднання були перевірені на коректність перед подачею живлення. Такий поетапний монтаж дозволяє забезпечити стабільну та безпечну роботу всієї системи під час подальшої експлуатації та тестування.

### **3.2 Програмування ESP-32: зчитування та вивід даних, відправка на сервер, веб-інтерфейс**

На цьому етапі розробки відбувається програмна реалізація всіх функціональних можливостей системи моніторингу. Програма, створена в середовищі Arduino IDE, відповідає за обробку даних із сенсорів, їх вивід на OLED-дисплей, формування веб-інтерфейсу з динамічними графіками, а також забезпечення доступу до даних у форматі JSON API через вбудований веб-

сервер. Основу логіки становить мікроконтролер ESP-32, який поєднує високопродуктивну обчислювальну платформу з вбудованим модулем Wi-Fi.

Програмна частина починається з підключення необхідних бібліотек, зокрема WiFi.h для роботи з мережею, Adafruit\_SHT4x – для зчитування показників температури і вологості з сенсора, а також Adafruit\_SSD1306 для керування OLED-дисплеєм. У розділі глобальних змінних задається назва мережі Wi-Fi, пароль доступу, а також створюється екземпляр веб-сервера, що слухає HTTP-запити на порту 80.

Початкова ініціалізація ESP-32 і підключення до мережі виконується у функції setup() (рисунок 3.7). Після запуску мікроконтролера здійснюється спроба підключення до заданої Wi-Fi мережі. На цьому етапі виводиться діагностична інформація до монітора порту, яка дозволяє відслідковувати процес з'єднання.

```

const char* ssid = "ESP32_WIFI";
const char* password = "12345678";
WiFiServer server(80);

void setup() {
  Serial.begin(115200);
  delay(1000);

  // Підключення до Wi-Fi
  WiFi.begin(ssid, password);
  Serial.print("Підключення до Wi-Fi");

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

  Serial.println("");
  Serial.println("WiFi підключено");
  Serial.print("IP-адреса: ");
  Serial.println(WiFi.localIP());

  server.begin();
}

```

Рисунок 3.7 – Ініціалізація Wi-Fi-з'єднання ESP-32

У процесі запуску програми на серійний порт виводиться діагностична інформація про підключення до мережі. Очікування відбувається в циклі while, до моменту отримання стабільного з'єднання, що засвідчується поверненням статусу WL\_CONNECTED.

Після цього ESP-32 отримує локальну IP-адресу, яка використовується для з'єднання з клієнтським пристроєм через браузер.

У системі моніторингу використовується цифровий сенсор SHT45, який підключається до ESP-32 через інтерфейс I2C.

Для роботи з ним застосовано бібліотеку Adafruit\_SHT4x, яка дозволяє легко ініціалізувати сенсор і зчитувати показники температури та вологості з високою точністю.

Першим кроком є ініціалізація об'єкта сенсора у глобальному просторі коду (рисунок 3.8). Це дозволяє звертатися до сенсора з будь-якої частини програми.

---

```
// Об'єкт датчика
SensirionI2cSht4x sht4x;

// Дані з датчика
float temperature = 0;
float humidity = 0;
```

---

Рисунок 3.8 – Оголошення об'єкта сенсора та змінних

У функції setup() виконується перевірка наявності сенсора на шині I2C. Якщо сенсор не знайдено, система зупиняє виконання, виводячи повідомлення в серійний порт (рисунок 3.9). Також задається точність вимірювань та вимикається підігрівач.

---

```
wire.begin();
sht4x.begin(wire, 0x44);
```

---

Рисунок 3.9 – Ініціалізація SHT45 у функції setup()

Зчитування даних відбувається в окремій функції `readSensorData()`. Значення температури та вологості зчитуються за допомогою функції `getEvent()` і зберігаються в окремі змінні.

Ці значення далі використовуються як для виводу на OLED-дисплей, так і для передачі на веб-сервер або активації оповіщення. Регулярне оновлення даних забезпечується періодичним викликом `readSensorData()` у циклі `loop()`.

Для виводу поточних значень температури, вологості та IP-адреси мікроконтролера, в проєкті використовується OLED-дисплей із роздільною здатністю 128 на 32 пікселі, що підключений через інтерфейс I2C. Задіяно окремий I<sup>2</sup>C-шинний об'єкт, що дозволяє уникнути конфліктів при підключенні інших пристроїв по I<sup>2</sup>C до стандартних пінів.

OLED-дисплей працює на контролері SSD1306 (рисунок 3.10), для якого використовується бібліотека `Adafruit_SSD1306`. Спочатку створюється окремий об'єкт шини I2C з індексом 1, а також об'єкт самого дисплея, в якому вказується ширина, висота, посилення на створену шину, та пін RESET (в даному випадку не використовується).

```
// Окремий I2C об'єкт для OLED
TwoWire I2COLED = TwoWire(1);

// Розміри дисплея
#define SCREEN_WIDTH 128
#define SCREEN_HEIGHT 32

Adafruit_SSD1306 display(SCREEN_WIDTH, SCREEN_HEIGHT, &I2COLED, -1);
```

Рисунок 3.10 – Створення об'єкта дисплея та I2C-шини

Далі здійснюється ініціалізація шини I2C із вказаними пін-контактами ESP-32: GPIO16 як лінія SDA та GPIO17 як SCL. Після чого ініціалізується сам дисплей із типовою адресою 0x3C. У разі невдалої ініціалізації робота програми зупиняється. Після успішної активації дисплей очищується, задається колір та розмір тексту, і виводиться повідомлення про готовність (рисунок 3.11).

---

```
// Ініціалізація другого I2C для OLED
I2COLED.begin(16, 17); // SDA = GPIO16, SCL = GPIO17

if (!display.begin(SSD1306_SWITCHCAPVCC, 0x3C)) { // 0x3C – типова адреса
  Serial.println(F("Не вдалося знайти OLED дисплей!"));
  while (true); // Зупинити все
}

display.clearDisplay();
display.setTextColor(SSD1306_WHITE);
display.setTextSize(1);
display.setCursor(0, 0);
display.println("OLED Ready...");
display.display();
```

---

Рисунок 3.11 – Ініціалізація OLED-дисплея

Вивід даних на дисплей здійснюється у функції, яка регулярно оновлює екран (рисунок 3.12).

---

```
// Оновлення OLED дисплея
display.clearDisplay();
display.setCursor(0, 0);

display.print("IP: ");
display.println(WiFi.localIP());

display.print("TEMPERATURE: ");
display.print(temperature, 1);
display.println(" C");
```

---

Рисунок 3.12 – Вивід інформації на дисплей

Спочатку дисплей очищується, після чого виводиться локальна IP-адреса пристрою, а також значення температури та вологості з округленням до одного знаку після коми. Наприкінці викликається метод `display()`, який фізично оновлює вміст екрану.

Таким чином, користувач отримує оперативну візуалізацію параметрів навколишнього середовища прямо на пристрої, що дозволяє використовувати систему автономно, без необхідності підключення до зовнішнього інтерфейсу.

Також для візуалізації даних у системі використовується вбудований веб-сервер, реалізований на мікроконтролері ESP-32. Він дозволяє переглядати поточні значення температури та вологості через будь-який веббраузер у локальній мережі. При відкритті сторінки користувач бачить зручний веб-інтерфейс з темною кольоровою схемою, який містить заголовок, таблицю з поточними, мінімальними та максимальними значеннями температури (в градусах Цельсія) та вологості (у відсотках), а також два графіки, що відображають динаміку цих параметрів у реальному часі.

Для побудови графіків використовується бібліотека Chart.js, а оновлення даних відбувається автоматично кожні 3 секунди завдяки запитам до JSON-інтерфейсу на ESP-32. Таким чином, веб-інтерфейс надає не лише зручну візуалізацію, а й базову аналітику, дозволяючи відстежувати зміну параметрів у динаміці. Код, призначений для генерації веб-інтерфейсу відображено у Додатку Б.

### **3.3 Реалізація оповіщення в системі**

Опис реалізації оповіщень у системі моніторингу базується на використанні звукового (бузер) та світлового (RGB-світлодіод) сповіщення. Таке рішення дозволяє негайно звернути увагу на перевищення критичних порогів температури або вологості у складських приміщеннях. Розглянемо детально, як реалізовано цей функціонал у програмному коді.

Для підключення бузера та світлодіода до мікроконтролера ESP32 використовуються цифрові виходи. На початку програми задаються константи (рисунок 3.13).

---

```
// Піни
const int buzzerPin = 32; // Бузер
const int redPin = 33; // Червоний канал світлодіода
const int greenPin = 25; // Зелений канал світлодіода
const int bluePin = 26; // Синій канал світлодіода
```

---

Рисунок 3.13 – Оголошення констант для роботи з світлодіодом та бузером

У функції `setup()` ці піни конфігуруються як вихідні (рисунок 3.14). Таким чином визначаються початкові налаштування кожного з пінів.

---

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

  // Ініціалізація пінів
  pinMode(buzzerPin, OUTPUT);
  pinMode(redPin, OUTPUT);
  pinMode(greenPin, OUTPUT);
  pinMode(bluePin, OUTPUT);

  // Вимкнути бузер і світлодіод на старті
  digitalWrite(buzzerPin, HIGH); // Вимкнений бузер
  digitalWrite(redPin, LOW);
  digitalWrite(greenPin, LOW);
  digitalWrite(bluePin, LOW);
}
```

---

Рисунок 3.14 – Налаштування пінів світлодіода та бузера в функції `setup()`

Для ефективного реагування системи на зміну мікрокліматичних умов (зокрема – температури та вологості), необхідно встановити граничні порогові значення, при перевищенні яких система буде подавати світловий і звуковий сигнал тривоги.

У програмному коді (рисунок 3.15) ці порогові значення задаються за допомогою констант типу `float`, оскільки температура та вологість вимірюються з десятковою точністю. Основна логіка сповіщення в системі полягає у постійному аналізі показників температури та вологості, отриманих із сенсора. Цей аналіз виконується на кожній ітерації основного циклу програми. Після

отримання актуальних значень температура та вологість порівнюються з наперед визначеними порогами.

```
// Пороги спрацювання
const float tempThreshold = 28.0; // Температура > 28°C
const float humThreshold = 65.0; // Вологість > 65%
```

Рисунок 3.15 – Програмний код встановлення порогових значень для системи оповіщення

У випадку, якщо хоча б один з параметрів перевищує допустимий рівень, система переходить у режим тривоги.

У такому режимі автоматично активується звукове сповіщення – буюер починає подавати сигнал, а візуальний індикатор на основі світлодіода RGB змінює свій колір на червоний. Це означає, що середовище перебуває у потенційно небезпечному стані, наприклад, через надмірну вологість або занадто високу температуру. Якщо ж обидва параметри знаходяться в межах норми, буюер вимикається, а світлодіод змінює колір на зелений, сигналізуючи, що умови є безпечними.

Одночасно з цим на OLED-дисплеї оновлюється інформація про поточну температуру, вологість та IP-адресу пристрою. Це дозволяє користувачу миттєво бачити стан системи навіть без доступу до веб-інтерфейсу. Таким чином, логіка сповіщення поєднує в собі як миттєву реакцію на зміни середовища, так і зручний спосіб інформування користувача через візуальні та звукові засоби.

Реалізація системи оповіщення на базі мікроконтролера ESP32 є ефективним рішенням для моніторингу критичних змін мікроклімату у складських приміщеннях. Застосування звукового та світлового індикаторів забезпечує миттєве інформування відповідальних осіб про порушення допустимих параметрів. Система є масштабованою та придатною до модернізації: її легко адаптувати під різні умови, змінити порогові значення або розширити функціональність за рахунок логування, фільтрації сигналів або

розширеного веб-інтерфейсу. Такий підхід сприяє підвищенню безпеки та ефективності зберігання продукції, чутливої до температури та вологості.

### 3.4 Тестування системи, аналіз точності, стабільності вимірювань та рекомендації щодо масштабування

Метою тестування є підтвердження працездатності та ефективності розробленої системи моніторингу у реальних умовах. Зокрема, перевіряється точність вимірювання температури та вологості, стабільність роботи пристрою протягом тривалого часу, швидкість реакції на зміну параметрів середовища, а також надійність механізмів сповіщення та візуалізації даних.

Тестування проводилося у стандартному складському приміщенні, де температура та вологість змінювались протягом дня залежно від зовнішніх умов. Система безперервно зчитувала показники з сенсора SHT4x та відображала їх як на OLED-дисплеї, так і у веб-інтерфейсі, що відкривається з будь-якого пристрою в локальній мережі. Зовнішній вигляд системи під час роботи за нормальних показників відображено на рисунку 3.16.

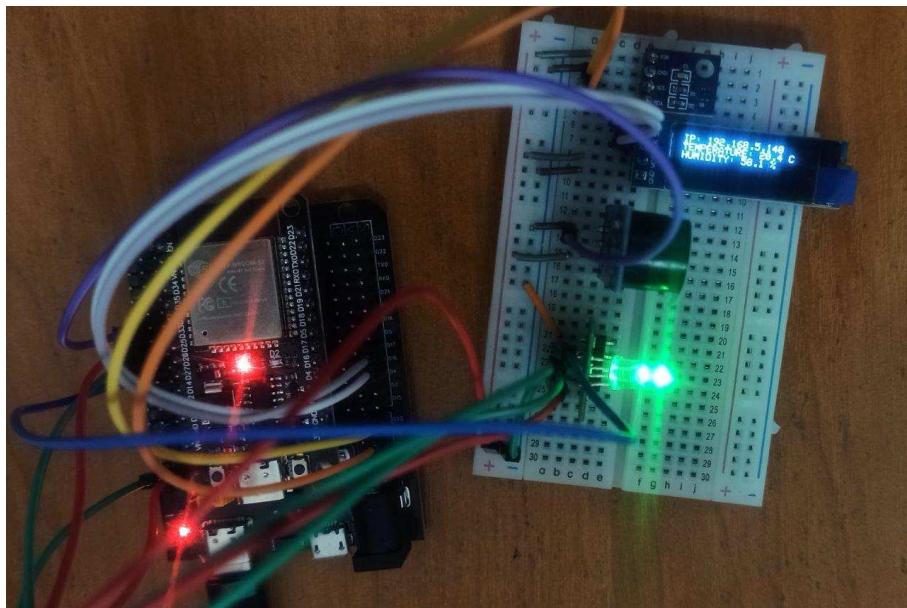


Рисунок 3.16 – Зовнішній вигляд системи за нормальних показників

У ході тестування особливу увагу приділено працездатності RGB-світлодіода та бузера як основних елементів сповіщення. Була перевірена реакція системи на ситуацію, коли значення температури перевищує встановлений поріг у 28 °С або вологість перевищує 65 %. У таких випадках система успішно активує звуковий сигнал та змінює колір світлодіода на червоний, чітко сигналізуючи про потенційно небезпечні умови (рисунок 3.17).

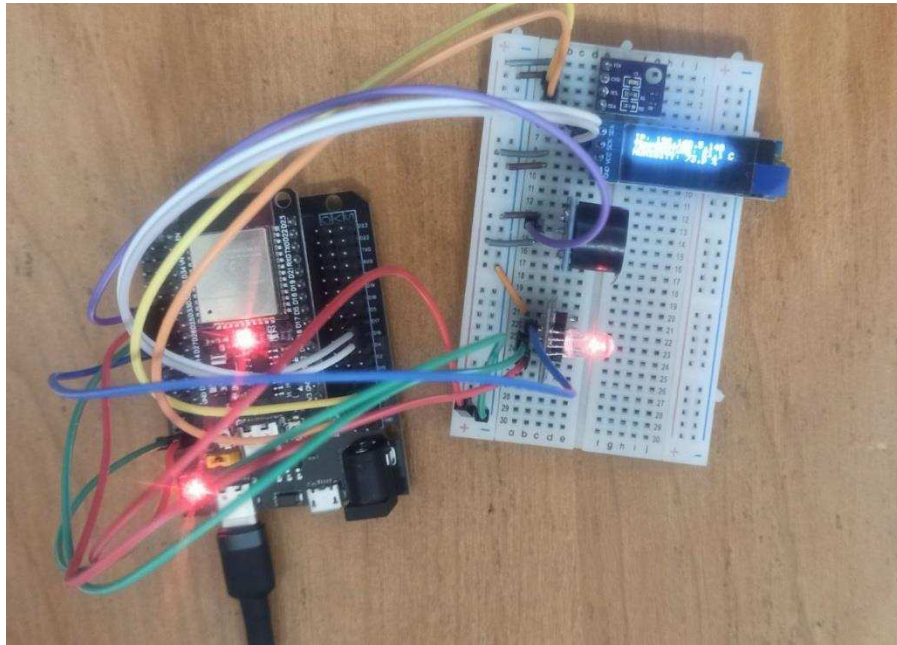


Рисунок 3.17 – Зовнішній вигляд системи при перевищенні критичних значень

Під час нормального режиму роботи, коли значення температури та вологості залишаються в межах допустимих, світлодіод світиться зеленим кольором, а буюер залишається вимкненим. Це дозволяє оператору швидко оцінити поточний стан середовища без потреби в додатковому аналізі.

На OLED-дисплеї виводиться поточна IP-адреса пристрою, а також значення температури та вологості з точністю до однієї десятої. Це забезпечує наочний локальний моніторинг, зокрема у разі відсутності доступу до веб-інтерфейсу.

У веб-інтерфейсі реалізовано сторінку з динамічно оновлюваними графіками, побудованими на основі бібліотеки Chart.js. Графіки відображають зміну температури та вологості в режимі реального часу, що дозволяє не лише

бачити поточні значення, а й аналізувати тенденції зміни клімату у приміщенні. Наприклад, при різкій зміні вологості графік буде виглядати як відображено на рисунку 3.10, а якщо при зміні температури, температурний графік буде виглядати як на рисунках 3.18 та 3.19.

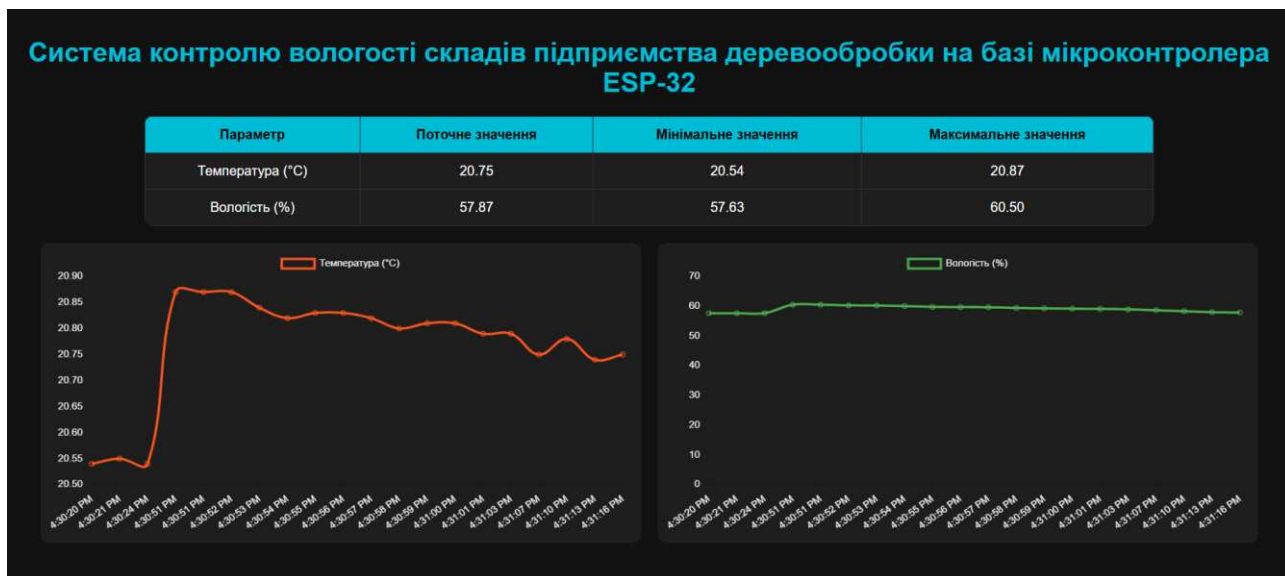


Рисунок 3.18 – Вигляд веб-інтерфейсу в режимі реального часу

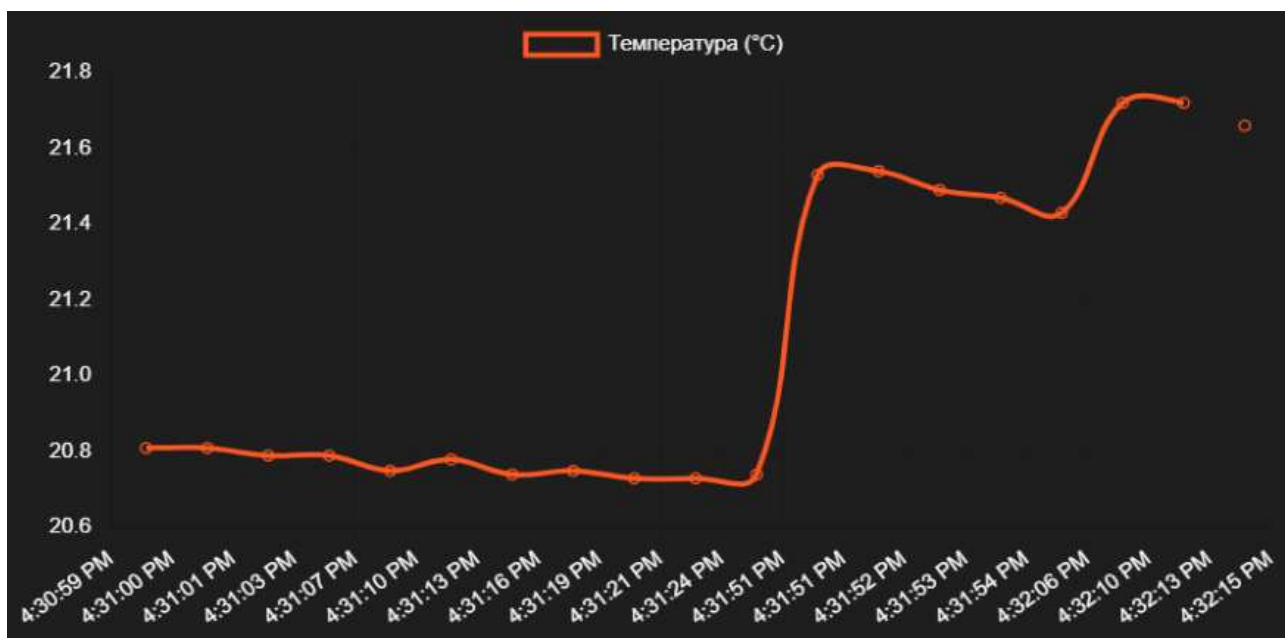


Рисунок 3.19 – Відображення зміни вологості на графіку

Окрім графіків, у веб-інтерфейсі реалізовано також таблицю даних, яка містить не лише актуальні показники температури та вологості, а й фіксує

максимальні та мінімальні значення за весь період роботи системи. Це дозволяє користувачу оперативно оцінювати не лише поточний стан середовища, а й відстежувати динаміку змін у межах заданого проміжку часу (рисунок 3.20).

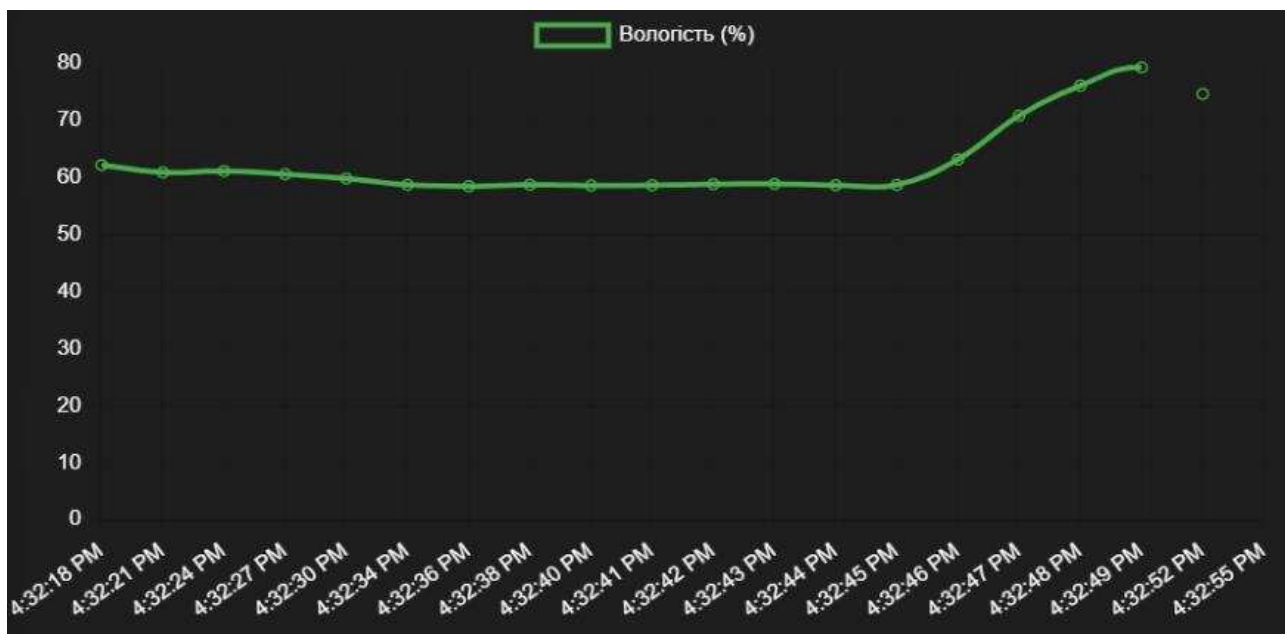


Рисунок 3.20 – Відображення зміни температури на графіку

Після кожного нового зчитування показників система порівнює їх з раніше зафіксованими мінімальними та максимальними значеннями. Якщо нове значення перевищує попередній максимум або є нижчим за попередній мінімум – відповідні комірки таблиці оновлюються автоматично. Це реалізовано засобами JavaScript та HTML з періодичним оновленням JSON-даних із мікроконтролера.

Подібне рішення значно розширює аналітичні можливості користувача без необхідності підключення зовнішньої бази даних. Таким чином, оператор має змогу побачити, наскільки змінювалось середовище у процесі спостереження – наприклад, чи були різкі стрибки вологості протягом доби, або наскільки сильно нагрівалось приміщення в обідній час.

На рисунку 3.21 наведено приклад таблиці у веб-інтерфейсі з відображенням поточних, мінімальних та максимальних значень температури та вологості.

Параметр	Поточне значення	Мінімальне значення	Максимальне значення
Температура (°C)	20.79	20.54	22.77
Вологість (%)	57.12	57.12	79.28

Рисунок 3.21 – Вигляд таблиці з поточними, мінімальними та максимальними показниками

Поєднання графіків і таблиці дозволяє здійснювати не лише візуальний моніторинг, а й швидкий аналіз ситуації на основі ключових статистичних параметрів. Це особливо важливо у випадках, коли система застосовується для зберігання вологочутливих або температурозалежних матеріалів, наприклад, деревини чи фарб.

Після тестування працездатності системи проведено аналіз точності та стабільності вимірювань, які здійснює сенсор SHT4x у складі розробленої IoT-системи моніторингу. Головна мета цього етапу – впевнитися у надійності отриманих даних та стабільній роботі системи протягом тривалого часу без потреби в постійному втручанні з боку користувача.

У процесі аналізу було виявлено, що сенсор SHT4x демонструє високу точність вимірювань як температури, так і вологості. У порівнянні з контрольним цифровим термогігрометром показники системи не відхилялись більше ніж на  $\pm 0.2$  °C по температурі та  $\pm 1.0$  % по вологості. Це відповідає технічним характеристикам сенсора, наведеним у документації виробника, та є абсолютно прийнятним для задач контролю мікроклімату у складських приміщеннях.

Крім того, система стабільно реагує на зміну кліматичних умов. При відкритті дверей складу або зміні джерел тепла/вологи, система швидко реєструє зміни, а графіки у веб-інтерфейсі відображають динаміку в реальному часі з оновленням кожні кілька секунд. Зокрема, при збільшенні вологості внаслідок випаровування чи вологості ззовні, графік вологості змінюється через 5-10 с. Аналогічно, при локальному нагріванні (наприклад, вплив прямого сонячного світла), сенсор реагує на зміну температури практично миттєво.

Особливо важливо, що система зберігає стабільність роботи навіть під час тривалого безперервного живлення. У тестовому режимі пристрій працював понад 48 годин без перезавантаження, зависання або втрати зв'язку з веб-інтерфейсом. Показники, які передаються через Wi-Fi, залишались узгодженими з локальним OLED-дисплеєм, а також коректно відображались як у таблиці, так і на графіках.

Періодичні перевірки на предмет «плаваючих» значень або аномальних стрибків показали відсутність суттєвих флуктуацій, що свідчить про належну фільтрацію сигналу на рівні сенсора та програмного забезпечення.

Після успішного тестування та аналізу точності й стабільності роботи розробленої системи моніторингу вологості та температури можна сформулювати низку рекомендацій щодо її подальшого удосконалення та масштабування для використання на великих підприємствах або в інших подібних умовах.

Поточна система базується на одному сенсорному модулі SHT4x, розміщеному у певній точці приміщення. У великих складських зонах або при зональному зберіганні продукції (наприклад, дерево, меблі, сировина) доцільно розширити систему за рахунок встановлення кількох сенсорних вузлів у різних частинах приміщення. Це дозволить більш точно моніторити просторові зміни параметрів середовища та швидше реагувати на локальні перевищення порогових значень.

Для зручності управління мережею таких пристроїв можна реалізувати централізований сервер збору даних. Кожен вузол (на базі ESP32) передаватиме дані через Wi-Fi до центрального вузла, де відбуватиметься зберігання, агрегація та візуалізація показників. Це дозволить не лише бачити картину в режимі реального часу, а й вести архів вимірювань для подальшого аналізу.

Крім того, варто розглянути можливість додавання резервного живлення (наприклад, з використанням акумулятора або блоків безперебійного живлення) для забезпечення безперервної роботи системи у разі відключення електроенергії. Іншим напрямком масштабування може бути впровадження віддаленого доступу через інтернет, з використанням хмарних платформ або

мобільного застосунку. Це дозволить здійснювати моніторинг у будь-який час і з будь-якої точки світу. У перспективі також можна реалізувати автоматичне керування мікрокліматом приміщення, наприклад, увімкнення вентиляції або зволожувачів при досягненні критичних значень. Такий підхід перетворить систему з моніторингової на інтегровану систему керування середовищем, що є наступним логічним кроком у її розвитку.

## ВИСНОВКИ

За результатами виконання кваліфікаційної роботи можна зробити відповідні висновки:

– аналітично досліджено питання способів контролю вологості деревини, зокрема, ручні та побутові прилади і визначено, що індивідуальні IoT-рішення вирізняються гнучкістю, точністю, автоматизацією й можливістю оперативного втручання;

– проведено аналіз існуючих засобів вимірювання вологості, що використовуються на підприємствах деревообробки та виявлено, що усі компоненти системи контролю вологості взаємодіють між собою через надійні інтерфейси, що забезпечує стабільну роботу системи у процесі експлуатації;

– розроблено та запрограмовано систему контролю вологості повітря на базі мікроконтролера ESP-32 з використанням ESP32, RGB-світлодіода KY-016, OLED-дисплея, сенсора SHT45. Спроектровано веб-інтерфейс для реалізації відтворення динамічних графіків, а також забезпечення доступу до даних у форматі JSON API через вбудований веб-сервер. Здійснено програмну реалізацію у середовищі Arduino IDE з використанням бібліотек, зокрема WiFi.h для роботи з мережею, Adafruit\_SHT4x для зчитування показників температури і вологості з сенсора, а також Adafruit\_SSD1306 для керування OLED-дисплеєм;

– проведено експериментальне тестування розробленої системи в умовах складських приміщень підприємства з метою перевірки точності, стабільності та швидкодії роботи та виявлено, що система є масштабованою та придатною до модернізації: її легко адаптувати під різні умови, змінити порогові значення або розширити функціональність за рахунок логування, фільтрації сигналів або розширеного веб-інтерфейсу;

– досліджено графіки поведінки системи на веб-інтерфейсі та підтверджено працездатність розробки, а також проведено аналіз точності та стабільності вимірювань, які здійснює сенсор SHT4x у складі розробленої IoT-системи моніторингу.

Розроблену систему можна використовувати для моніторингу просторових змін параметрів середовища складських приміщень деревини. Система забезпечує візуалізацію моніторингу через веб-інтерфейс, що дозволяє вчасно реагувати на локальні перевищення порогових значень температур у досліджуваних приміщеннях.

## ПЕРЕЛІК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Лошик Д. В., Христинець Н. А. Архітектурна реалізація системи контролю якості деревини за допомогою датчиків та мікроконтролера ESP-32. *Актуальні питання, проблеми та перспективи розвитку науки і освіти* : Зб. тез доп. III Міжнар. міждисциплінар. науково-практ. конф., м. Полтава, 24-26 квіт. 2025 р. С. 34-36
2. Термогігрометр TESTO 605-H1 (5..95 %; -10..+50 °C). «Термолаб» – контакти, товари, послуги, ціни. URL: <https://surl.li/qnojah> (дата звернення: 11.03.2025).
3. Вологомір діелектричний T660, Trotec, Німеччина. ТОВ «ХІМЛАБОРРЕАКТИВ». URL: <https://surl.cc/clqngs> (дата звернення: 11.03.2025).
4. Термометр-гігрометр Xiaomi Miija Bluetooth Thermometer 2 – фото, відгуки, характеристики в магазині Смарт Ера. *Смарт Ера – Інтернет магазин*. URL: <https://surl.li/nikiih> (дата звернення: 21.02.2025).
5. Цифровий кліматичний термогігрометр ThermoPro TP-50 термометр гігрометр. *Rozetka.ua*. URL: <https://surl.cc/eunmic> (дата звернення: 12.03.2025).
6. DHT22/AM2302 термометр і гігрометр датчик вологості та температури. *Rozetka.ua*. URL: <https://surl.lt/gitthx> (дата звернення: 28.03.2025).
7. Датчик температури вологості і тиску Барометр BME280 3.3V. *Rozetka.ua*. URL: <https://surl.li/ozacrz> (дата звернення: 21.04.2025).
8. IOT-based transformer monitoring health system. *International Research Journal of Modernization in Engineering Technology and Science*. 2023. Vol. 1, no. 5. P. 124-137
9. Adhau D. S. Empowering Homes with Esp-32. *International Scientific Journal of Engineering and Management*. 2024. Vol. 03, no. 04. P. 1-9.
10. Baumann P. Temperature Sensors. *Selected Sensor Circuits*. Wiesbaden, 2022. P. 1-22. URL: [https://doi.org/10.1007/978-3-658-38212-4\\_1](https://doi.org/10.1007/978-3-658-38212-4_1) (date of access: 11.05.2025).

11. Das S., Saxena S., Rout N. K. Low Cost Smart-Glass using ESP-32. *2021 IEEE 2nd International Conference on Applied Electromagnetics, Signal Processing, & Communication (AESPC)*, Bhubaneswar, India, 26-28 November 2021. 2021. P. 76-92
12. Rajashekar M. IoT Based Transformer Monitoring System using ESP-32. *International Journal for Research in Applied Science and Engineering Technology*. 2024. Vol. 12, no. 5. P. 1-23
13. IoT Editorial Office I. Acknowledgment to the Reviewers of IoT in 2022. *IoT*. 2023. Vol. 4, no. 1. P. 56. URL: <https://doi.org/10.3390/iot4010003> (date of access: 11.05.2025).

# ДОДАТКИ

**Додаток А**  
**Апробація роботи**



Державний заклад  
«Луганський національний університет імені Тараса Шевченка»  
Рада молодих учених і здобувачів вищої освіти



**СЕРТИФІКАТ**

№ 000546

засвідчує, що

**Дмитро Лошик**

взяв/взяла участь у

III МІЖНАРОДНІЙ МІЖДИСЦИПЛІНАРНІЙ НАУКОВО-ПРАКТИЧНІЙ КОНФЕРЕНЦІЇ  
«АКТУАЛЬНІ ПИТАННЯ, ПРОБЛЕМИ ТА ПЕРСПЕКТИВИ РОЗВИТКУ НАУКИ ТА ОСВІТИ»  
30 годин, 1 кредит ЄКТС

РЕКТОР, ГОЛОВА  
ПРОГРАМНОГО КОМІТЕТУ



**Олена КАРАМАН**

**24-26 квітня 2025 року**  
**Полтава, Україна**

# АРХІТЕКТУРНА РЕАЛІЗАЦІЯ СИСТЕМИ КОНТРОЛЮ ЯКОСТІ ДЕРЕВИНИ ЗА ДОПОМОГОЮ ДАТЧИКІВ ТА МІКРОКОНТРОЛЕРА ESP-32

**Лошик Дмитро Валерійович,**  
студент 4 курсу, здобувач рівня вищої освіти - бакалавр,  
спеціальність 123 «Комп'ютерна інженерія»,  
Луцький національний технічний університет, м. Луцьк, Україна,  
[dimaloshik@gmail.com](mailto:dimaloshik@gmail.com)

**Науковий керівник** – Христинець Наталія Анатоліївна, к.т.н., доцент,  
доцент кафедри комп'ютерної інженерії та безпеки Луцького національного  
технічного університету, м. Луцьк, Україна,  
[nkhrystynets@gmail.com](mailto:nkhrystynets@gmail.com)

Важливим питанням підтримки якості деревини та ефективності її використання на складах пиломатеріалів є дослідження її вологості. Склади в невеликих містах та селах, де здійснюється вирубка дерев, не завжди мають сучасну та ефективну систему контролю вологості. Відсутність належного контролю може призвести до того, що деревина, яка відправляється до замовника, не відповідає оптимальним показникам якості і це може спричинити значні втрати: матеріал може змінити свої властивості, деформуватися або пошкодитися внаслідок підвищеної вологості, а також стати непридатним для подальшої обробки [1]. В результаті, замовники отримують деревину, що не відповідає вимогам. Тобто, проблема оптимізації мікрокліматичних умов складських приміщень деревообробних підприємств без значних капітальних витрат залишається важливим та актуальним завданням сьогодення.

З аналізу досліджень [2-3] відомо, що ефективний контроль за рівнем вологості на складах деревини може значно знизити ризик виникнення дефектів матеріалу, пов'язаних з його надмірною вологістю або сухістю, а використання сучасних технологій моніторингу та автоматизованих систем контролю мікроклімату, таких як датчики вологості, температури та інші сенсори, дозволяє забезпечити стабільність умов зберігання деревини без значних фінансових витрат. Зазначено [4], що мікроконтролер ESP32 є чудовим вибором для бюджетних IoT-систем контролю деревини на складах через його доступність, енергоефективність і широкий набір функцій. Проте, не багато публікацій, які висвітлюють питання формування схеми контролю з розрахунками параметрів (числових значень показників) і методикою їх налаштувань.

Метою дослідження є побудова системи контролю вологості складського приміщення для зберігання деревини з використанням мікроконтролерів ESP32. Сукупність функцій та характеристик мікроконтролера подані у таблиці 1:

Таблиця 1 – Параметри системи контролю вологості на базі ESP32 (складено автором)

Етапи реалізації	Виконувана робота	Деталізація
Збір та обробка даних	Підключення датчиків	датчики вологості (DHT22, SHT31, AM2301), температури (DS18B20), газів (MQ-135)
	Локальна обробка	ПК (смартфон)
Керування пристроями	Автоматизація	при підвищеній вологості вмикаються вентилятори, осушувачі або підігрівачі через реле або транзистори.
	Розумне регулювання	вмикати вентиляцію лише в критичній зоні

З урахуванням вищезазначеного, сформовано схему контролю (рисунок 1).

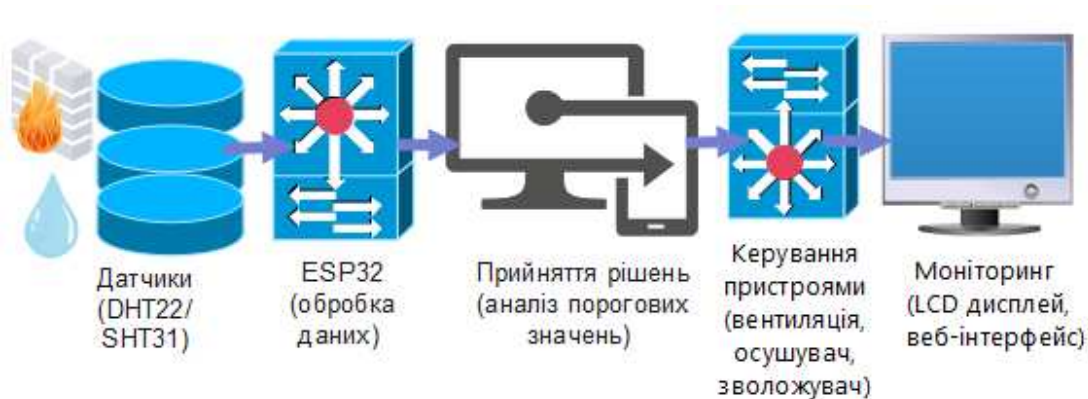


Рисунок 1 – Схема організації контролю вологості складу (складено автором)

Досліджені числові характеристики для кожного етапу схеми контролю вологості. Допустимі значення датчиків DHT22/SHT31 діапазон вимірювання вологості: 0–100% RH (з точністю  $\pm 2\text{--}5\%$  RH), Діапазон вимірювання температури:  $-40^{\circ}\text{C}$  до  $+125^{\circ}\text{C}$  (з точністю  $\pm 0.3\text{--}0.5^{\circ}\text{C}$ ), частота зчитування – 1 раз на 2-5 секунд, що забезпечує оперативність оновлення даних. Для обробки даних на базі мікроконтролера ESP32 номінальні значення тактової частоти: 160–240 МГц, до 520 КБ SRAM, час обробки сигналу від датчика  $<10$  мс, а споживана потужність  $\approx 100$  мА у робочому режимі. Прийняття рішень допускає граничне значення вологості для активації пристроїв  $>60\%$  RH у випадку вентиляції, або  $<40\%$  RH у випадку зволоження. Час реакції на зміну вологості складає менше 1 секунди. Керування пристроями можливе при допустимих значеннях напруги реле для керування від 5V до 24V, потужності вентиляції 30–200 Вт, осушувача 100–500 Вт, зволожувача 50–300 Вт. Моніторинг проводиться з типом дисплея OLED 128x64, або LCD 16x2 з затримкою передачі даних  $<1$  сек за технологією Wi-Fi. Ці характеристики можуть змінюватися залежно від модифікацій конкретного обладнання.

Аналіз числових характеристик показав, що ESP32 здатний швидко обробляти дані, а бездротовий модуль Wi-Fi забезпечує **дистанційний моніторинг** параметрів у реальному часі. Це дозволяє зробити висновок, що запропонована архітектура дозволяє адаптувати систему під різні умови експлуатації без значних капіталовкладень.

#### Список використаних джерел

1. Серединський В. В., Олевський М. Ю. Особливості товарознавчого дослідження лісоматеріалів та пиломатеріалів. *Товарознавчий вісник*. 2021. Т. 1, № 14. С. 275–283. URL: <https://doi.org/10.36910/6775-2310-5283-2021-14-26> (дата звернення: 10.03.2025).
2. Sokolovskyi I. A. Енергетична характеристика режимів сушіння букових пиломатеріалів. *Scientific Bulletin of UNFU*. 2019. Т. 29, № 1. С. 106–109. URL: <https://doi.org/10.15421/40290123> (дата звернення: 10.03.2025).
3. Застосування деревини в умовах агресивних середовищ / С. С. Гомон та ін. *Сучасні технології та методи розрахунків у будівництві*. 2022. № 17. С. 15–22. URL: [https://doi.org/10.36910/6775-2410-6208-2022-7\(17\)-02](https://doi.org/10.36910/6775-2410-6208-2022-7(17)-02) (дата звернення: 10.03.2025).
4. Жежкун І. М., Торосов А. С., Калашніков А. О. Сучасні тенденції функціонування ринку деревини України. *Forestry and Forest Melioration*. 2024. № 144. С. 129–140. URL: <https://doi.org/10.33220/1026-3365.144.2024.129> (дата звернення: 10.03.2025).

## Додаток Б

### Код для генерації веб-інтерфейсу

```
// Функція відправки сторінки HTML
void sendHTMLPage(WiFiClient client) {
    String html = "<!DOCTYPE html><html><head><meta charset='UTF-8'>";
    html += "<title>Моніторинг температури та вологості</title>";
    html += "<script src='https://cdn.jsdelivr.net/npm/chart.js'></script>";
    html += "<style>";
    html += "body { background-color: #121212; color: #ffffff; font-family: Arial, sans-serif; text-align: center; margin: 0; padding: 20px; }";
    html += "h1 { color: #00bcd4; }";
    html += ".charts { display: flex; justify-content: center; gap: 20px; flex-wrap: wrap; }";
    html += "canvas { background-color: #1e1e1e; border-radius: 10px; padding: 10px; }";
    html += "table { margin: 20px auto; border-collapse: collapse; width: 80%; background-color: #1e1e1e; border-radius: 10px; overflow: hidden; }";
    html += "th, td { border: 1px solid #333; padding: 12px; }";
    html += "th { background-color: #00bcd4; color: black; }";
    html += "td { color: #ffffff; }";
    html += "</style>";
    html += "</head><body>";
    html += "<h1>Система контролю вологості складів підприємства деревообробки на базі мікроконтролера ESP-32</h1>";

    html += "<table>";
    html += "<thead><tr><th>Параметр</th><th>Поточне значення</th><th>Мінімальне значення</th><th>Максимальне значення</th></tr></thead>";
    html += "<tbody>";
    html += "<tr><td>Температура (°C)</td><td id='currTemp'>-</td><td id='minTemp'>-</td><td id='maxTemp'>-</td></tr>";
    html += "<tr><td>Вологість (%)</td><td id='currHum'>-</td><td id='minHum'>-</td><td id='maxHum'>-</td></tr>";
    html += "</tbody></table>";

    html += "<div class='charts'>";
    html += "<canvas id='tempChart' width='400' height='200'></canvas>";
    html += "<canvas id='humChart' width='400' height='200'></canvas>";
    html += "</div>";

    html += "<script>";
    html += "let minTemp = Infinity, maxTemp = -Infinity, minHum = Infinity, maxHum = -Infinity;";
    html += "const tempCtx = document.getElementById('tempChart').getContext('2d');";
    html += "const humCtx = document.getElementById('humChart').getContext('2d');";

    html += "const tempChart = new Chart(tempCtx, {";
    html += "type: 'line',";
    html += "data: { labels: [], datasets: [{ label: 'Температура (°C)', data: [], borderColor: '#ff5722', backgroundColor: 'transparent', tension: 0.4 } ] },";
    html += "options: { scales: { x: { ticks: { color: '#ffffff' } }, y: { ticks: { color: '#ffffff' }, beginAtZero: false } }, plugins: { legend: { labels: { color: '#ffffff' } } } } }";
```

```

html += "});";

html += "const humChart = new Chart(humCtx, {";
html += "type: 'line',";
html += "data: { labels: [], datasets: [{ label: 'Вологість (%)', data: [],";
borderColor: '#4caf50', backgroundColor: 'transparent', tension: 0.4 } ] },";
html += "options: { scales: { x: { ticks: { color: '#ffffff' } }, y: { ticks: {";
color: '#ffffff' }, beginAtZero: true } }, plugins: { legend: { labels: { color:";
'#ffffff' } } } }";
html += "});";

html += "function updateData() {";
html += "fetch('/data').then(response => response.json()).then(data => {";
html += "const now = new Date().toLocaleTimeString(";
html += "tempChart.data.labels.push(now);";
html += "tempChart.data.datasets[0].data.push(data.temperature);";
html += "humChart.data.labels.push(now);";
html += "humChart.data.datasets[0].data.push(data.humidity);";
html += "if (tempChart.data.labels.length > 20) { tempChart.data.labels.shift(";
tempChart.data.datasets[0].data.shift(); }";
html += "if (humChart.data.labels.length > 20) { humChart.data.labels.shift(";
humChart.data.datasets[0].data.shift(); }";
html += "tempChart.update(";
html += "humChart.update(";
html += "document.getElementById('currTemp').innerText =";
data.temperature.toFixed(2);";
html += "document.getElementById('currHum').innerText =";
data.humidity.toFixed(2);";
html += "if (data.temperature < minTemp) minTemp = data.temperature;";
html += "if (data.temperature > maxTemp) maxTemp = data.temperature;";
html += "if (data.humidity < minHum) minHum = data.humidity;";
html += "if (data.humidity > maxHum) maxHum = data.humidity;";
html += "document.getElementById('minTemp').innerText = minTemp.toFixed(2);";
html += "document.getElementById('maxTemp').innerText = maxTemp.toFixed(2);";
html += "document.getElementById('minHum').innerText = minHum.toFixed(2);";
html += "document.getElementById('maxHum').innerText = maxHum.toFixed(2);";
html += "});";
html += "}";

html += "setInterval(updateData, 3000);";
html += "</script>";

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

client.println("HTTP/1.1 200 OK");
client.println("Content-Type: text/html");
client.println("Connection: close");
client.println();
client.println(html);
}

```