

**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 охоронних систем**

(повне найменування кафедри)

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

**Мікроконтролерна система вимірювання кліматичних параметрів та прогнозування опадів**

**MICROCONTROLLER SYSTEM FOR MEASURING CLIMATIC  
PARAMETERS AND PREDICTING PRECIPITATION**

спеціальність 123 Комп'ютерна інженерія

(шифр і назва спеціальності)

освітня програма Комп'ютерна інженерія

(назва освітньої програми)

Виконав: здобувач вищої освіти  
групи КІ-41  
Ваник Владислав Олегович

(підпис)

Керівник:  
к.ф.-м.н.  
Бурбан Олександр Вікторович

(підпис)

Кваліфікаційну роботу  
допущено до захисту  
«      »        червня        2026 р.

Гарант освітньої програми:

к.т.н., доцент  
Лавренчук Світлана Василівна

(підпис)

Луцьк – 2026 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. Г. Терлецький

« 23 » 12 2025 р.

ЗАВДАННЯ  
НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ ЗДОБУВАЧУ ВИЩОЇ ОСВІТИ

*Ванику Владиславу Олеговичу*

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема кваліфікаційної роботи *Мікроконтролерна система вимірювання кліматичних параметрів та прогнозування опадів*

Керівник роботи *к.ф.-м.н., Бурбан Олександр Вікторович*

затверджені наказом закладу вищої освіти від «20» грудня 2025 року № 536/01-02

2. Строк подання здобувачем вищої освіти кваліфікаційної роботи 28.05.2026 р.

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, різні інтернет-ресурси технічного спрямування*

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

*Вступ*

*Аналіз предметної області та наявних рішень*

*Вибір методів та технологій для реалізації проекту*

*Практична реалізація мікроконтролерної системи*

*Висновки*

5. Перелік графічного (ілюстративного) матеріалу:

*Функціональна схема системи*

*Схема під'єднання компонентів пристрою*

*3D-модель корпусу пристрою*

*Зовнішній вигляд пристрою*

## 6. Консультанти розділів роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис	
		завдання видав	завдання прийняв
<i>Аналіз предметної області та наявних рішень</i>	<i>Бурбан О. В., доцент</i>		
<i>Вибір методів та технологій для реалізації проєкту</i>	<i>Бурбан О. В., доцент</i>		
<i>Практична реалізація мікроконтролерної системи</i>	<i>Бурбан О. В., 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 23.12.2025 р.

## КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів кваліфікаційної роботи	Строк виконання етапів роботи	Примітка
1.	<i>Огляд літератури із досліджуваної проблеми, аналіз предметної області та наявних рішень</i>	до 10.02.2026 р.	
2.	<i>Аналіз предметної області та наявних рішень</i>	до 02.03.2026 р.	
3.	<i>Вибір методів та технологій для реалізації проєкту</i>	до 02.04.2026 р.	
4.	<i>Практична реалізація мікроконтролерної системи формування додатків</i>	до 10.04.2026 р.	
5.	<i>Представлення остаточного варіанту кваліфікаційної роботи керівникові</i>	до 01.05.2026 р.	
6.	<i>Нормоконтроль</i>	до 23.05.2026 р.	
7.	<i>Інструментальна перевірка на академічний плагіат</i>	до 19.05.2026 р.	
8.	<i>Здача кваліфікаційної роботи та всіх супровідних документів на кафедру</i>	до 30.05.2026 р.	

Здобувач вищої освіти

---

(підпис)

Владислав ВАНИК

---

(прізвище, ініціали)

Керівник кваліфікаційної роботи

---

(підпис)

Олександр БУРБАН

---

(прізвище, ініціали)

## АНОТАЦІЯ

Ваник В. В. Мікроконтролерна система вимірювання кліматичних параметрів та прогнозування опадів. Рукопис.

Кваліфікаційна робота бакалавра ОП «Комп'ютерна інженерія» спеціальності 123 Комп'ютерна інженерія. Луцький національний технічний університет. Луцьк, 2026.

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

Перший розділ присвячено огляду предметної області, розглянуто основні параметри мікроклімату: температуру, відносну вологість та атмосферний тиск та їх вплив на здоров'я і працездатність людини. Досліджено методи та засоби вимірювання цих параметрів. Розглянуто методи прогнозування опадів на основі аналізу зміни атмосферного тиску. Наведено огляд існуючих систем вимірювання кліматичних параметрів .

В другому розділі здійснено вибір та обґрунтування методів і технологій для реалізації проекту. Описано алгоритм прогнозування опадів для мікроконтролера. Обґрунтовано вибір керуючої платформи та описано складові елементи системи.

Третій розділ присвячено практичній реалізації системи. Виконано проектування принципової електричної схеми пристрою, описано процес виготовлення та монтажу. Розроблено програму керування пристроєм.

Ключові слова: Arduino Nano, ВМЕ280, температура, вологість, атмосферний тиск, прогнозування опадів, моніторинг навколишнього середовища.

## ANNOTATION

Vanyk V. Microcontroller system for measuring climatic parameters and predicting precipitation.

Qualifying work of a bachelor of EP «Computer Engineering» specialty 123 Computer Engineering. Lutsk National Technical University. Lutsk, 2026.

Qualification work consists of an introduction, three sections, conclusions, a references, and an appendix.

The first section is devoted to an overview of the subject area, examining the main microclimate parameters – temperature, relative humidity and atmospheric pressure – and their impact on human health and work capacity. Methods and means of measuring these parameters are investigated. Methods for forecasting precipitation based on the analysis of changes in atmospheric pressure are discussed. An overview of existing systems for measuring climatic parameters is provided.

In the second section, the selection and justification of methods and technologies for implementing the project are presented. The precipitation forecasting algorithm for the microcontroller is described. The choice of the control platform is justified and the system's components are described.

The third section is devoted to the practical implementation of the system. The design of the device's schematic diagram is presented, and the manufacturing and assembly process is described. A control program for the device has been developed.

Keywords: Arduino Nano, BME280, temperature, humidity, atmospheric pressure, precipitation forecasting, environmental monitoring.

## ЗМІСТ

ВСТУП .....	7
РОЗДІЛ 1 АНАЛІЗ ПРЕДМЕТНОЇ ОБЛАСТІ ТА НАЯВНИХ РІШЕНЬ .....	8
1.1 Параметри мікроклімату та їх вплив на людину .....	8
1.2 Методи та засоби вимірювання температури, вологості й тиску .....	11
1.3 Методи прогнозування опадів на основі зміни атмосферного тиску .....	18
1.4 Приклади існуючих систем вимірювання кліматичних параметрів .....	22
РОЗДІЛ 2 ВИБІР МЕТОДІВ ТА ТЕХНОЛОГІЙ ДЛЯ РЕАЛІЗАЦІЇ ПРОЄКТУ ..	29
2.1 Архітектура алгоритму для мікроконтролера .....	29
2.2 Обґрунтування вибору керуючого мікроконтролера .....	32
2.3 Опис складових елементів системи .....	38
РОЗДІЛ 3 ПРАКТИЧНА РЕАЛІЗАЦІЯ МКРОКОНТРОЛЕРНОЇ СИСТЕМИ ..	43
3.1 Проектування електричної схеми пристрою .....	43
3.2 Виготовлення пристрою .....	46
3.3 Створення програми керування пристрою .....	50
3.4 Опис та тестування розробленої системи .....	53
ВИСНОВКИ .....	55
ПЕРЕЛІК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ .....	56

## ВСТУП

Актуальність теми. Сучасні мікроконтролерні платформи є ефективним засобом для реалізації систем моніторингу навколишнього середовища. Вони дозволяють створювати компактні, доступні за вартістю рішення з широкими функціональними можливостями. Крім того, сучасні тенденції розвитку інтелектуальних вбудованих систем передбачають не лише збір даних, але й їх аналіз та інтерпретацію, зокрема, прогнозування погодних умов на основі динаміки зміни атмосферного тиску. Отже, дослідження методів побудови мікроконтролерних систем вимірювання кліматичних параметрів є важливим науково-практичним завданням.

Метою роботи є розробка мікроконтролерної системи вимірювання кліматичних параметрів та прогнозування опадів.

Об'єкт дослідження – технології та методи реалізації вимірювання кліматичних параметрів та прогнозування погодних умов у вбудованих системах.

Предмет дослідження – мікроконтролерна система вимірювання температури, відносної вологості та атмосферного тиску з функцією прогнозування опадів.

Завдання, які необхідно виконати:

- здійснити аналіз предметної області;
- розглянути методи та засоби прогнозування опадів;
- обґрунтувати вибір елементної бази системи;
- розробити програмне забезпечення мікроконтролерної системи;
- виготовити працюючу модель системи вимірювання кліматичних параметрів та прогнозування опадів.

## РОЗДІЛ 1

### АНАЛІЗ ПРЕДМЕТНОЇ ОБЛАСТІ ТА НАЯВНИХ РІШЕНЬ

#### 1.1 Параметри мікроклімату та їх вплив на людину

Мікроклімат – це сукупність фізичних факторів навколишнього середовища в обмеженому просторі, що безпосередньо впливають на тепловий стан організму людини. До основних параметрів мікроклімату відносять температуру повітря, відносну вологість, атмосферний тиск, швидкість руху повітря та теплове випромінювання. Комплексна дія цих чинників визначає комфортність умов перебування людини, її самопочуття, працездатність і здоров'я [1].

Проблема нормування та контролю параметрів мікроклімату є актуальною для житлових приміщень, закладів освіти, офісів і виробничих об'єктів. Недотримання гігієнічних норм мікроклімату призводить до зниження продуктивності праці, розвитку захворювань та погіршення якості життя людини [2].

Температура повітря є одним із найважливіших параметрів мікроклімату, оскільки вона безпосередньо визначає умови теплообміну між організмом людини та навколишнім середовищем. Людський організм підтримує сталу температуру тіла в межах  $36,4-36,9^{\circ}\text{C}$  за рахунок процесів терморегуляції [3].

Оптимальна температура для житлових та офісних приміщень у холодний період року становить  $20-22^{\circ}\text{C}$ , у теплий –  $22-25^{\circ}\text{C}$  [4]. Відхилення від цих значень суттєво впливає на самопочуття людини: при підвищеній температурі (понад  $28^{\circ}\text{C}$ ) прискорюється серцебиття, знижується концентрація уваги, зростає ризик теплового удару; при зниженій (нижче  $16^{\circ}\text{C}$ ) – підвищується ймовірність застудних захворювань, погіршується координація рухів і розумова діяльність [1].

Відносна вологість – це відношення фактичного вмісту водяної пари в повітрі до максимально можливого за даної температури, виражене у відсотках.

Цей параметр суттєво впливає на процеси терморегуляції організму, оскільки визначає інтенсивність випаровування вологи з поверхні шкіри [2].

Оптимальний діапазон відносної вологості для приміщень становить 40-60 % [4]. При підвищеній вологості понад 75 % посилюється відчуття духоти, утруднюється тепловіддача організму, створюються умови для розмноження плісневих грибків та кліщів, що викликають алергічні реакції [5]. При зниженій вологості (менше 30 %) пересихають слизові оболонки носа та горла, що знижує місцевий імунітет і підвищує сприйнятливість до респіраторних інфекцій, також виникає сухість шкіри та подразнення очей [3].

Атмосферний тиск – це тиск атмосферного повітря на всі предмети та живі організми. Стандартний атмосферний тиск на рівні моря становить 101 325 Па (760 мм рт. ст.) [6]. Організм людини адаптований до певного діапазону тиску, і його коливання впливають на самопочуття, особливо у людей із серцево-судинними та вегетативними розладами.

Зниження атмосферного тиску супроводжується зменшенням парціального тиску кисню у повітрі, що може спричинити головний біль, запаморочення, зниження працездатності. Різкі перепади тиску є тригером загострень у метеочутливих людей. Крім прямого фізіологічного впливу, зміна атмосферного тиску є важливим індикатором погодних умов: стійке зниження тиску, як правило, свідчить про наближення циклону та появу опадів [6].

Рух повітря в приміщенні впливає на інтенсивність конвективного теплообміну між тілом людини та навколишнім середовищем. Оптимальна швидкість руху повітря в приміщеннях становить 0,1-0,3 м/с залежно від сезону [4]. Підвищена швидкість руху повітря (протяги) при низькій температурі призводить до переохолодження, особливо шийного відділу та верхніх дихальних шляхів. При високій температурі помірний рух повітря, навпаки, сприяє охолодженню організму [2].

Комплексна дія температури, вологості та швидкості руху повітря визначає теплове самопочуття людини. Дослідження показують, що відхилення

температури всього на 3-4° С від оптимальної знижує продуктивність розумової праці на 15-25 % [3]. Для оцінки сумісної дії цих факторів використовують поняття ефективної температури – інтегрального показника, що враховує температуру, вологість і рух повітря одночасно [1].

Встановлено, що в умовах оптимального мікроклімату (температура 21-23° С, вологість 45-55 %) людина демонструє найвищий рівень концентрації уваги, швидкості реакції та якості прийняття рішень [5]. При значних відхиленнях від норми спостерігається швидка втомлюваність, зниження мотивації та збільшення кількості помилок у роботі.

Несприятливий мікроклімат чинить значне навантаження на серцево-судинну систему. В умовах підвищеної температури та вологості збільшується частота серцевих скорочень, зростає навантаження на серце через необхідність посиленого кровопостачання шкіри для тепловіддачі. Тривале перебування в умовах спеки може призвести до теплового виснаження або теплового удару [6].

Різкі коливання атмосферного тиску є відомим тригером гіпертонічних кризів та серцево-судинних катастроф у вразливих категорій населення. За даними досліджень, у дні різких змін атмосферного тиску кількість викликів швидкої медичної допомоги з приводу серцево-судинних захворювань зростає на 20-30 % [1].

Параметри мікроклімату, передусім вологість і температура, безпосередньо визначають стан слизових оболонок дихальних шляхів, які є першим бар'єром захисту від інфекцій. Суха тепла атмосфера (вологість менше 30 %) пригнічує активність в'їй миготливого епітелію, що забезпечують механічне очищення дихальних шляхів [2].

Водночас надмірна вологість сприяє утворенню конденсату на стінах і поверхнях, що є сприятливим середовищем для розвитку цвілевих грибків та бактерій. Спори грибків, потрапляючи в дихальні шляхи, можуть спричиняти хронічні бронхіти, бронхіальну астму та алергічні захворювання [5].

Мікроклімат приміщення суттєво впливає на психологічний стан та емоційний фон людини. Дослідження в галузі екологічної психології свідчать,

що перебування в задушливих, перегрітих або занадто холодних приміщеннях підвищує рівень тривожності, знижує стресостійкість та погіршує міжособистісну взаємодію [3]. Встановлено також зв'язок між низьким рівнем освітленості та вологістю і розвитком сезонних депресивних розладів.

В Україні параметри мікроклімату виробничих, громадських та житлових приміщень регламентуються відповідними державними санітарними нормами. Для виробничих приміщень діють санітарні норми ДСН 3.3.6.042-99 [4], для навчальних закладів і офісів – відповідні будівельні норми та санітарні правила.

Контроль дотримання нормативних значень мікроклімату здійснюється за допомогою спеціалізованих приладів – термометрів, гігрометрів, барометрів та анемометрів, або комплексних мікроконтролерних систем моніторингу [6].

## **1.2 Методи та засоби вимірювання температури, вологості й тиску**

Вимірювання фізичних параметрів навколишнього середовища: температури, вологості та атмосферного тиску, є основою систем моніторингу мікроклімату. Точність та надійність вимірювань визначають якість отримуваної інформації і, відповідно, ефективність прийнятих рішень щодо регулювання умов перебування людини. Сучасна вимірювальна техніка пропонує широкий спектр методів і засобів для отримання цих даних, від класичних механічних приладів до цифрових мікроелектронних сенсорів [7].

Розвиток мікроелектроніки та технологій MEMS (мікроелектромеханічні системи) суттєво розширив можливості створення компактних, точних і енергоефективних давачів, які інтегруються в мікроконтролерні системи моніторингу [8].

Методи вимірювання температури поділяються на контактні та безконтактні. При контактному методі вимірювальний перетворювач безпосередньо торкається досліджуваного об'єкта або середовища; при безконтактному – реєструється теплове випромінювання об'єкта без фізичного контакту [7].

До основних принципів, що використовуються в контактних засобах вимірювання, відносять:

- термометричний – розширення рідини або газу;
- терморезистивний – зміна електричного опору;
- термоелектричний – термо-ЕРС на межі різнорідних провідників;
- напівпровідниковий – цифрові інтегральні датчики.

Рідинні термометри є найбільш традиційними засобами вимірювання температури. Принцип їх дії ґрунтується на тепловому розширенні рідини (ртуті, спирту, гасу) в скляному капілярі [9]. Ртутні термометри (рис. 1.1) забезпечують вимірювання в діапазоні від  $-35$  до  $+750^{\circ}\text{C}$  з похибкою  $0,1-0,5^{\circ}\text{C}$ , однак через токсичність ртуті їх застосування поступово обмежується.



Рисунок 1.1 – Конструкція рідинного термометра [10]

Терморезистори – це резистивні перетворювачі, опір яких змінюється зі зміною температури. Розрізняють два типи: терморезистори з позитивним (РТС) та негативним (НТС) температурним коефіцієнтом опору. Термістори типу НТС широко застосовуються в побутовій та промисловій електроніці завдяки високій чутливості (зміна опору в десятки разів на  $100^{\circ}\text{C}$ ) та відносно низькій вартості [7].

Платинові терморезистори (PT100, PT1000) відзначаються високою точністю і стабільністю характеристик; вони застосовуються в прецизійних вимірювальних системах з похибкою менше  $0,1^{\circ}\text{C}$  [8].

Термопара – перетворювач, що використовує ефект Зеебека. На межі двох різнорідних провідників виникає термо-ЕРС, пропорційна різниці температур між гарячим і холодним спаями [9]. Термопари застосовуються для вимірювання в широкому діапазоні температур (від  $-200$  до  $+1800^{\circ}\text{C}$ ) і є незамінними в промислових умовах. Недоліком є необхідність компенсації холодного спаю та відносно невелика чутливість (порядку  $10\text{-}60\text{ мкВ}/^{\circ}\text{C}$ ).

Сучасні інтегральні датчики температури поєднують вимірювальний перетворювач та аналого-цифровий перетворювач в одному корпусі. Вони мають цифровий вихід (I2C, SPI, 1-Wire) і безпосередньо передають значення температури мікроконтролеру [8]. Прикладами є датчики DS18B20 (1-Wire, похибка  $\pm 0,5^{\circ}\text{C}$ ), LM75 (I2C) та багатофункціональний сенсор VME280 (рис. 1.2), що вимірює одночасно температуру, вологість і тиск.



Рисунок 1.2 – Зовнішній вигляд датчика VME280 [11]

Вологість повітря характеризується кількома величинами: абсолютною вологістю, відносною вологістю та точкою роси. У практиці моніторингу мікроклімату найчастіше вимірюють відносну вологість. Основні методи її вимірювання: психрометричний, сорбційний, конденсаційний та ємнісний [12].

Психрометричний метод ґрунтується на різниці показань сухого та вологого термометрів. Вологий термометр має чохол, змочений дистильованою водою; випаровування води охолоджує його. Чим нижча відносна вологість повітря, тим інтенсивніше випаровування і тим більша різниця показань [9].

За психрометричними таблицями або формулою Августа за різницею температур визначають відносну вологість. Перевагами методу є простота і відсутність потреби в калібруванні; недоліком – необхідність регулярного змочування чохла та відносно низька точність при вологості нижче 30 % [12].

Гігрометр психрометричний зображений на рисунку 1.3.

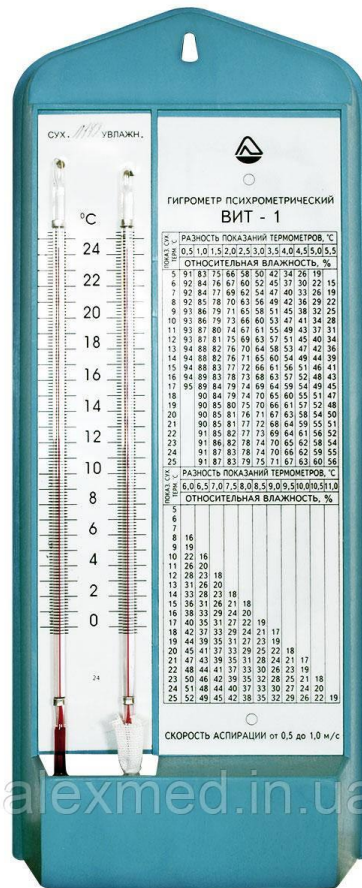


Рисунок 1.3 – Гігрометр психрометричний [13]

Волосяний гігрометр використовує властивість знежиреного людського волосся змінювати свою довжину залежно від вологості повітря: при підвищенні вологості волосся подовжується, при зниженні – скорочується [9]. Зміна довжини передається на стрілку або перо самописця. Діапазон вимірювань

становить 30-100 % відносної вологості, похибка – 3-5 %. Прилад простий у використанні, але потребує регулярного калібрування і не придатний для точних вимірювань.

Ємнісні датчики є основою більшості сучасних електронних гігрометрів. Принцип дії полягає у зміні діелектричної проникності полімерної або оксидної плівки при поглинанні нею молекул води, що призводить до зміни електричної ємності конденсатора [8]. Ємнісні перетворювачі мають такі переваги: широкий діапазон вимірювань (0-100 %), висока точність ( $\pm 2-3$  %), малий час відгуку, можливість мініатюризації.

Датчики DHT11 і DHT22, широко застосовувані в мікроконтролерних проєктах, використовують саме ємнісний принцип для вимірювання вологості (рис. 1.4). DHT22 забезпечує точність  $\pm 2-5$  % у діапазоні 0-100 % [8]. Датчик VME280 також застосовує ємнісний сенсор вологості з точністю  $\pm 3$  % у діапазоні 0-100 % відносної вологості.

### Working of Capacitive Sensors

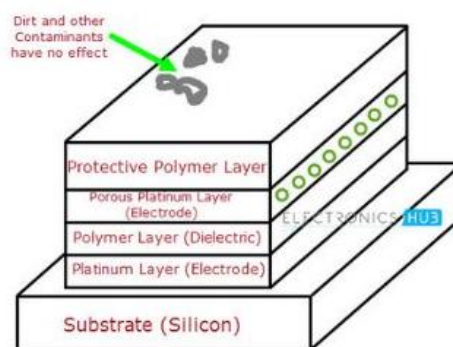


Рисунок 1.4 – Структурна схема ємнісного датчика вологості

Конденсаційний гігрометр охолоджує полірована металева поверхня (дзеркало) до температури, при якій на ній починає конденсуватися волога. Ця температура є точкою роси, за якою розраховується відносна вологість [12]. Метод забезпечує найвищу точність, до  $\pm 0,1^{\circ}\text{C}$  за точкою роси і

використовується як еталонний, проте прилади коштовні й складні в обслуговуванні.

Прилади для вимірювання атмосферного тиску називаються барометрами. За принципом дії вони поділяються на рідинні (ртутні), механічні (анероїдні) та електронні (п'єзорезистивні, ємнісні) [14].

Ртутний барометр (рис. 1.5) є еталонним приладом для вимірювання атмосферного тиску. Він являє собою скляну трубку, заповнену ртуттю, перевернуту у ванночку з ртуттю. Атмосферний тиск урівноважує стовп ртуті у трубці, висота якого і є мірою тиску [15]. Стандартний атмосферний тиск відповідає висоті стовпа ртуті 760 мм. Прилад забезпечує високу точність, але непридатний для мобільного застосування через крихкість і токсичність ртуті.

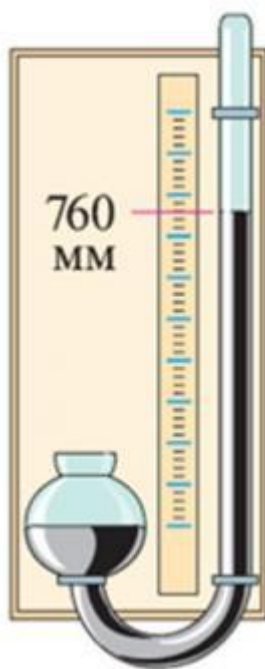


Рисунок 1.5 – Чашковий ртутний барометр [15]

Анероїдний барометр – механічний прилад, у якому чутливим елементом є металева гофрована коробка (анероїд), з якої відкачане повітря [9]. При зміні атмосферного тиску коробка деформується, і ця деформація через систему важелів передається на стрілку. Барографи – різновид анероїдного барометра. Вони записують зміни тиску на паперовій стрічці в часі.

Анероїди компактні (рис. 1.6), прості в використанні та не містять рідини, що робить їх зручними для польових і побутових вимірювань. Похибка становить 1-2 гПа [15].



Рисунок 1.6 – Анероїдний барометр [15]

П'єзорезистивні датчики (рис. 1.7) є основою сучасних електронних барометрів. Принцип дії ґрунтується на зміні електричного опору напівпровідникових тензорезисторів при деформації кремнієвої мембрани під дією тиску [8]. Датчики виготовляються за технологією MEMS і мають мікроскопічні розміри при високій точності вимірювань.

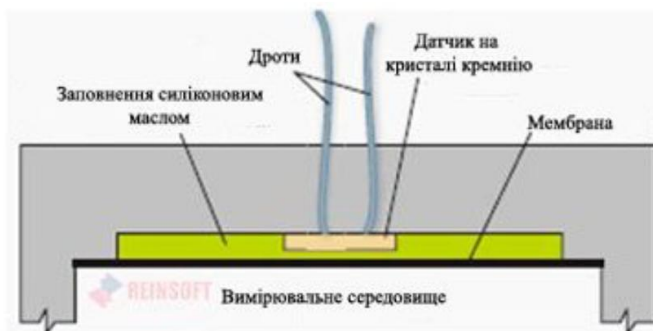


Рисунок 1.7 – П'єзорезистивний датчик тиску [16]

Широко застосований датчик BMP180 (Bosch) забезпечує вимірювання тиску в діапазоні 300-1100 гПа з точністю  $\pm 0,12$  гПа [14]. Його наступник BME280 – вимірює тиск з роздільною здатністю 0,18 Па та абсолютною похибкою  $\pm 1$  гПа, що дозволяє визначати висоту над рівнем моря з точністю близько 1 м [8].

В ємнісних датчиках тиску деформація мембрани змінює відстань між обкладками конденсатора, що призводить до зміни його ємності [12]. Такі датчики відзначаються малим енергоспоживанням і стабільністю характеристик, проте потребують складнішої схеми обробки сигналу порівняно з п'єзорезистивними.

Сучасна тенденція в розробці вимірювальних систем – застосування комбінованих сенсорів, що вимірюють кілька параметрів одночасно. Це спрощує конструкцію системи, зменшує кількість компонентів і знижує вартість [8].

Датчик BME280 виробництва компанії Bosch є на сьогодні одним із найбільш збалансованих рішень для систем моніторингу мікроклімату завдяки поєднанню трьох вимірювальних каналів, цифрового інтерфейсу I2C/SPI, малих розмірів і низького енергоспоживання [8].

### **1.3 Методи прогнозування опадів на основі зміни атмосферного тиску**

Прогнозування погодних умов, зокрема опадів, є важливим завданням як для метеорології, так і для побутових та промислових застосувань. Атмосферний тиск є одним із ключових метеорологічних параметрів, динаміка зміни якого тісно пов'язана з розвитком погодних процесів. Взаємозв'язок між змінами атмосферного тиску та появою опадів відомий давно і широко використовується як у професійній метеорології, так і в спрощених алгоритмах прогнозування для вбудованих систем [16].

Сучасні мікроконтролерні пристрої моніторингу мікроклімату дедалі частіше оснащуються функцією короткострокового прогнозування погоди на основі аналізу тенденцій зміни атмосферного тиску. Це дозволяє надавати

користувачу корисну інформацію без підключення до зовнішніх метеосервісів [17].

Атмосферний тиск формується під впливом маси повітряного стовпа над певною точкою земної поверхні. Нерівномірний розподіл тиску в атмосфері є рушійною силою вітрів і визначає переміщення повітряних мас [16]. У синоптичній метеорології виділяють два типи барометричних утворень:

Циклон – область зниженого атмосферного тиску з висхідними потоками повітря. Підйом повітря супроводжується його охолодженням, конденсацією водяної пари та утворенням хмар і опадів.

Антициклон – область підвищеного тиску з низхідними потоками повітря. Опускання повітря призводить до його нагрівання і розсіювання хмарності, що зумовлює суху ясну погоду [18].

Таким чином, зниження атмосферного тиску, як правило, свідчить про наближення циклону і є провісником погіршення погоди та випадання опадів. Підвищення тиску, навпаки, асоціюється з покращенням погодних умов.

Не лише абсолютне значення атмосферного тиску, але й швидкість його зміни є важливою прогностичною ознакою. У метеорології використовують поняття барометричної тенденції – зміни тиску за 3 години [18]. Залежно від величини та знаку тенденції формуються якісні прогнози:

- зниження тиску на 1-2 гПа за три години – можливе погіршення погоди;
- зниження на 3-5 гПа за три години – очікується погіршення погоди з опадами;
- зниження більше ніж на 5-6 гПа за три години – штормове попередження, інтенсивні опади [17].

Підвищення тиску інтерпретується симетрично: помірне зростання вказує на покращення погоди, стрімке – на швидку зміну синоптичної ситуації.

Абсолютне значення тиску також несе прогностичну інформацію. Тиск нижче 1000 гПа (750 мм рт. ст.) зазвичай відповідає циклонічній погоді; вище 1020-1025 гПа – антициклональній [18]. Однак інтерпретація абсолютних

значень залежить від географічного розташування і сезону, тому в локальних системах моніторингу більш надійним є аналіз відносних змін тиску.

Метод барометричної тенденції є найпростішим і найпоширенішим у побутових метеостанціях та вбудованих системах. Алгоритм ґрунтується на обчисленні різниці між поточним значенням тиску та значенням, виміряним 1, 3 або 6 годин тому [17]. За величиною і знаком цієї різниці формується якісний прогноз.

Типова таблиця прийняття рішень для алгоритму на основі тригодинної тенденції наведено в таблиці 1.1.

Таблиця 1.1 – Параметри прийняття рішень для алгоритму на основі тригодинної тенденції

Зміна тиску за три год (гПа)	Прогноз
>+3	Покращення, ясно
від +1 до +3	Покращення погоди
від -1 до +1	Без суттєвих змін
від -3 до -1	Можливі погіршення
від -6 до -3	Очікуються опади
<-6	Шторм, сильні опади

Цей підхід відрізняється простотою реалізації та мінімальними вимогами до обчислювальних ресурсів, що робить його застосовним для мікроконтролерних систем.

Метод Замбретті розроблений у 1920 році і є більш досконалим алгоритмом порівняно з простою барометричною тенденцією [19]. Він враховує три фактори одночасно:

- поточне абсолютне значення атмосферного тиску;
- тенденцію зміни тиску (зростає / стабільний / знижується);
- пору року (зима або літо).

На основі цих трьох параметрів алгоритм визначає один із 26 літерних кодів (від А до Z), кожному з яких відповідає конкретний словесний прогноз погоди, від «Ясно, без змін» до «Шторм з грозами» [19].

Метод Замбретті широко реалізований у мікроконтролерних проєктах на базі Arduino, оскільки він достатньо простий для програмної реалізації і при

цьому забезпечує більш точний прогноз, ніж проста тенденція. Точність методу для помірних широт оцінюється на рівні 70-80 % для прогнозу на 6-12 годин [19].

Для підвищення надійності прогнозу в умовах зашумлених вимірювань застосовують методи згладжування часового ряду тиску. Найпоширенішим є метод ковзного середнього, при якому поточне значення замінюється середнім арифметичним кількох попередніх вимірювань за формулою (1.1) [17]:

$$P_{smooth}(t) = \frac{1}{N} \sum_{i=0}^{N-1} P(t - i \cdot \Delta t), \quad (1.1)$$

де  $N$  – кількість точок згладжування;

$\Delta t$  – інтервал між вимірюваннями.

Згладжений ряд дозволяє виділити загальну тенденцію зміни тиску, відфільтрувавши короткочасні коливання, спричинені вимірювальними шумами або добовим ходом тиску [18]. У мікроконтролерних системах зазвичай застосовують  $N = 5-12$  точок з інтервалом вимірювання 10-15 хвилин.

Більш досконалим варіантом є експоненційне згладжування відповідно до виразу (1.2), яке надає більшу вагу останнім вимірюванням:

$$P_{smooth}(t) = \alpha \cdot P(t) + (1 - \alpha) \cdot P_{smooth}(t - 1), \quad (1.2)$$

де  $\alpha$  – коефіцієнт згладжування ( $0 < \alpha < 1$ ) [17].

Регресійні методи передбачають побудову математичної моделі залежності ймовірності опадів від набору предикторів, головним з яких є атмосферний тиск та його зміна [16]. Лінійна регресія обчислюється за формулою (1.3):

$$P_{rain} = a_0 + a_1 \cdot p + a_2 \cdot \frac{dp}{dt} + a_3 \cdot \frac{d^2p}{dt^2}, \quad (1.3)$$

де  $P_{rain}$  – ймовірність опадів;

$p$  – поточний тиск;

$dp/dt$  – швидкість зміни тиску;

$d^2p/dt^2$  – прискорення зміни тиску;

$a_0...a_3$  – коефіцієнти регресії, визначені на основі навчальної вибірки [16].

Логістична регресія дозволяє отримати ймовірність бінарної події (є опади / немає опадів) у діапазоні 0-1, що зручно для представлення результату прогнозу користувачу у відсотках [20].

Сучасні підходи до прогнозування погоди активно використовують методи машинного навчання: нейронні мережі, метод опорних векторів (SVM), дерева прийняття рішень та ансамблеві методи. Для прогнозування опадів за часовими рядами тиску найбільш ефективними є рекурентні нейронні мережі (RNN) та їх різновид – мережі з довгою короткочасною пам'яттю (LSTM).

Однак методи машинного навчання потребують великих навчальних вибірок, значних обчислювальних ресурсів і є надмірно складними для реалізації у вбудованих мікроконтролерних системах. Тому вони застосовуються переважно на серверній стороні з передачею результатів на пристрій відображення [20].

#### **1.4 Приклади існуючих систем вимірювання кліматичних параметрів**

Системи вимірювання кліматичних параметрів набули широкого поширення як у професійній метеорології, так і в побутовому та промисловому застосуванні. Сучасний ринок пропонує широкий спектр рішень – від простих аналогових термогігrometerів до складних автоматизованих метеостанцій із хмарною інтеграцією та функціями прогнозування погоди. Паралельно активно розвивається напрям аматорських та освітніх розробок на базі відкритих мікроконтролерних платформ, таких як Arduino та ESP8266/ESP32 [21].

На сьогодні існує великий спектр комерційних систем вимірювання кліматичних параметрів

Oregon Scientific BAR208HG – популярна побутова бездротова метеостанція американського виробника Oregon Scientific (рис. 1.8) [22]. Пристрій складається з базової станції та виносного бездротового датчика, що розміщується на вулиці.



Рисунок 1.8 – Метеостанція Oregon Scientific BAR208HG [22]

Технічні характеристики пристрою:

- вимірювання температури в діапазоні  $-20...+60^{\circ}\text{C}$  з точністю  $\pm 1^{\circ}\text{C}$ ;
- вимірювання відносної вологості 20-99 % з точністю  $\pm 5\%$ ;
- вимірювання атмосферного тиску 795-1050 гПа;
- радіус бездротової передачі даних до 100 м;
- відображення прогнозу погоди у вигляді піктограм на 24 години;
- підключення до ПК через USB для збереження даних.

Перевагами системи є зручний інтерфейс, наявність бездротового виносного датчика та функція прогнозування. Недоліками – відносно висока вартість та закрита програмна архітектура, що унеможливорює модифікацію алгоритмів [17].

Netatmo Weather Station – «розумна» домашня метеостанція французького виробника Netatmo, орієнтована на інтеграцію з хмарними сервісами та смартфонами (рис. 1.9) [18].



Рисунок 1.9 – Метеостанція Netatmo Weather Station [23]

Технічні характеристики цього пристрою наступні:

- внутрішній модуль: температура  $-10...+40^{\circ}\text{C}$ , вологість 0-100 %, рівень  $\text{CO}_2$ , рівень шуму;
- зовнішній модуль: температура  $-40...+65^{\circ}\text{C}$ , вологість 0-100 %;
- зв'язок через Wi-Fi (802.11 b/g/n);
- хмарна платформа з API для доступу до даних;
- мобільний додаток для iOS та Android;
- участь у мережі глобального моніторингу Weather Map.

Система вирізняється сучасним дизайном, широкими можливостями інтеграції та участю в краудсорсинговій мережі метеоспостережень [23].

Обмеженням є залежність від хмарного сервісу та необхідність постійного підключення до інтернету.

Davis Vantage Vue (рис. 1.10) – напівпрофесійна автоматична метеостанція американського виробника Davis Instruments, що застосовується на особистих метеостанціях, у сільському господарстві та наукових дослідженнях.



Рисунок 1.10 – Метеостанція Davis Vantage Vue [24]

Її технічні характеристики:

- температура:  $-40...+65^{\circ}\text{C}$ , точність  $\pm 0,5^{\circ}\text{C}$ ;
- вологість: 1-100 %, точність  $\pm 2\%$ ;
- тиск: 540-1100 гПа, точність  $\pm 0,8$  гПа;
- вимірювання швидкості та напрямку вітру, кількості опадів (дошомір), УФ-індекс, сонячна радіація;
- бездротова передача даних на відстань до 300 м;
- сумісність з програмним забезпеченням WeatherLink для архівування та аналізу.

Вона забезпечує значно вищу точність і функціональність порівняно з побутовими аналогами, однак є надмірно складною і дорогою для звичайного побутового застосування [24].

Vaisala HMT330 – промисловий вимірювач температури та вологості фінської компанії Vaisala, призначений для застосування в чистих кімнатах, фармацевтичному виробництві та науково-дослідних лабораторіях [24].

Технічні характеристики даного комплексу:

- температура:  $-40\dots+180^{\circ}\text{C}$ , точність  $\pm 0,1^{\circ}\text{C}$ ;
- вологість: 0-100 %, точність  $\pm 0,6\%$ ;
- аналоговий та цифровий вихід (RS-485, Modbus);
- вбудований дисплей та можливість калібрування на місці.

Прилад є еталонним засобом вимірювання, що застосовується для перевірки і калібрування інших датчиків. Висока вартість робить його недоступним для широкого використання [24].

Також досить поширеними є аматорські та освітні розробки на базі мікроконтролерів

Один із найбільш поширених відкритих проєктів – метеостанція на базі Arduino Uno з датчиком DHT22 та барометричним модулем BMP180 (рис. 1.11).

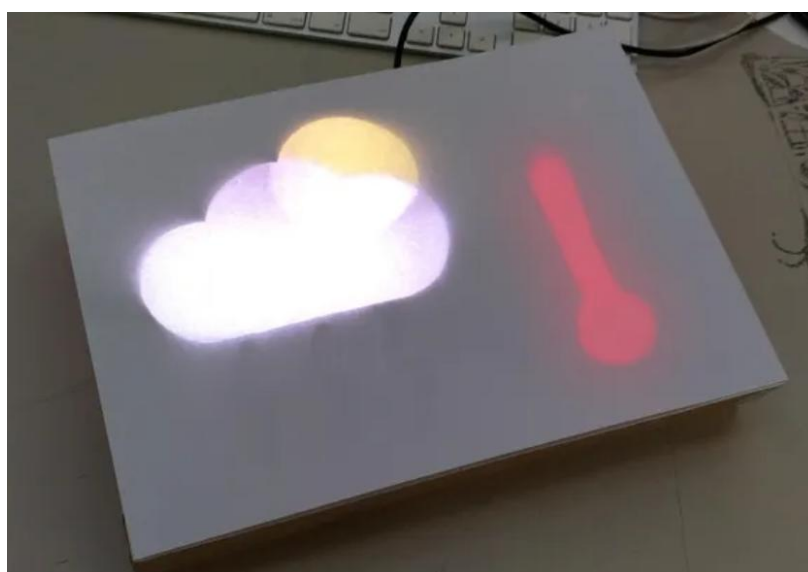


Рисунок 1.11 – Зовнішній вигляд проєкту Arduino Weather Station [25]

Проект є базовим навчальним прикладом і не передбачає прогнозування погоди або бездротової передачі даних [25].

Більш розвинений проект британського розробника G6EJD, опублікований на GitHub, реалізує повноцінну метеостанцію з функцією прогнозування погоди за методом Замбретті (рис. 1.12) [26].

Проект вирізняється якістю програмної реалізації та детальною документацією. Він слугує основою для багатьох похідних розробок.



Рисунок 1.12 – Інтерфейс відображення проекту G6EJD [26]

Проект IoT-метеостанції на базі ESP8266, опублікований на платформі Hackster.io, реалізує передачу даних вимірювань до хмарного сервісу ThingSpeak [27].

Функціональні можливості даної метеостанції:

- безперервне вимірювання температури, вологості та тиску;
- передача даних на хмарний сервіс кожні 15-60 секунд;
- побудова графіків зміни параметрів у реальному часі у браузері;
- можливість перегляду даних з будь-якого пристрою через інтернет;
- налаштування сповіщень при виході параметрів за задані межі.

Проект демонструє підхід до побудови IoT-систем моніторингу мікроклімату [27].

У науковій літературі описані більш складні системи моніторингу мікроклімату на базі бездротових сенсорних мереж. Одним із прикладів є

система, розроблена в Національному університеті «Львівська політехніка», що реалізує багатоточковий моніторинг мікроклімату навчальних приміщень [28].

Система являє собою мережу вузлів на базі ESP32 з датчиками BME280 та CO<sub>2</sub> (MH-Z19). Вона підтримує бездротову передачу даних за протоколом MQTT, містить центральний сервер на базі Raspberry Pi з базою даних InfluxDB та має веб-інтерфейс візуалізації на платформі Grafana. Автоматичне сповіщення персоналу відбувається при відхиленні параметрів від норми.

Система дозволяє одночасно моніторити мікроклімат у кількох приміщеннях з централізованим збереженням та аналізом даних. Вона є прикладом розвинутого IoT-рішення для освітніх закладів [28].

Аналіз існуючих систем вимірювання кліматичних параметрів свідчить про широке різноманіття доступних рішень – від простих побутових термогігrometerів до складних IoT-платформ і промислових вимірювальних систем. Комерційні пристрої відзначаються зручністю використання та розвинутою функціональністю, але мають закриту архітектуру і значну вартість. Аматорські та освітні розробки на базі Arduino та ESP32 демонструють можливість побудови функціональних систем моніторингу мікроклімату при мінімальних витратах.

## РОЗДІЛ 2

### ВИБІР МЕТОДІВ ТА ТЕХНОЛОГІЙ ДЛЯ РЕАЛІЗАЦІЇ ПРОЄКТУ

#### 2.1 Архітектура алгоритму для мікроконтролера

Для реалізації прогнозування опадів у мікроконтролерній системі на базі Arduino Nano найбільш прийнятним є поєднання методу барометричної тенденції зі згладжуванням ковзним середнім або експоненційним фільтром [17]. Даний метод реалізується такими кроками:

- зчитування поточного значення тиску з датчика з фіксованим інтервалом (5-15 хв);
- запис значень у кільцевий буфер для зберігання даних за останні 1-6 годин;
- обчислення згладженого значення тиску;
- розрахунок барометричної тенденції як різниці між поточним і попереднім (1-3 год тому) згладженим значенням;
- порівняння тенденції з пороговими значеннями та формування прогнозу.

Для зберігання історії вимірювань тиску в мікроконтролері використовується масив (кільцевий буфер). При інтервалі вимірювання 10 хвилин і глибині аналізу 3 години необхідно зберігати 18 значень типу float (4 байти кожне), що потребує лише 72 байти оперативної пам'яті [17]. Для Arduino Nano з 2 кБайт SRAM це є цілком прийнятним.

При необхідності зберігання добової історії (для відображення графіків або більш глибокого аналізу) кількість значень зростає до 144, що займає 576 байт. У цьому випадку доцільно застосовувати стиснення даних або зовнішню пам'ять (EEPROM) [13].

Ефективність алгоритму прогнозування суттєво залежить від правильного вибору порогових значень тенденції. Ці значення можуть відрізнятися для різних кліматичних зон. Для помірного клімату України рекомендовані порогові значення тригодинної тенденції:

- зниження більше 3 гПа – висока ймовірність опадів (понад 70 %);

- зниження 1-3 гПа – помірна ймовірність опадів (40-70 %);
- зміна в межах  $\pm 1$  гПа – стабільна погода;
- зростання 1-3 гПа – покращення погоди;
- зростання більше 3 гПа – суха ясна погода [19].

Програма мікроконтролера функціонує відповідно до циклічного алгоритму, який складається з двох основних етапів: початкової ініціалізації апаратних компонентів та безперервного виконання головного робочого циклу (рис. 2.1).

На етапі ініціалізації виконується послідовне підключення та налаштування всіх апаратних складових системи: LCD-дисплея з інтерфейсом I2C, датчика атмосферного тиску і температури BMP180, модуля годинника реального часу RTC та світлодіодного RGB-індикатора. У процесі ініціалізації здійснюється перевірка доступності кожного з ключових компонентів – датчика BMP180 та модуля RTC. У разі виявлення несправності або відсутності відповіді від пристрою на шині I2C система виводить на дисплей повідомлення про помилку та припиняє подальше виконання програми. За умови успішної ініціалізації всіх компонентів зчитуються поточні показники часу з модуля RTC, а також початкові значення температури та тиску з датчика BMP180. Отримані дані використовуються для первинного заповнення масивів, призначених для побудови графіків зміни параметрів, після чого на дисплеї відображається головний екран системи.

Після завершення ініціалізації програма переходить до виконання головного робочого циклу, який повторюється безперервно протягом усього часу функціонування пристрою. На кожній ітерації циклу послідовно виконуються чотири основні операції.

Першою операцією є зчитування поточних значень температури та атмосферного тиску з датчика BME280. Отримані дані зберігаються у відповідних змінних і використовуються як для безпосереднього відображення на дисплеї, так і для подальшого накопичення в масивах графіків. Зчитування

виконується з фіксованим часовим інтервалом, що забезпечує рівномірну дискретизацію вимірювального сигналу.

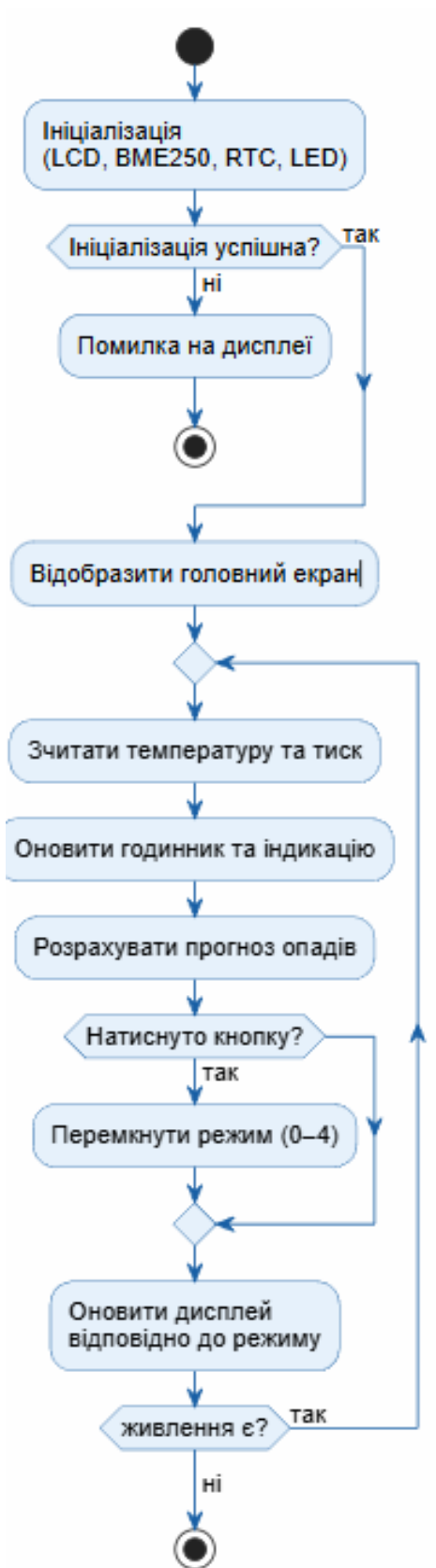


Рисунок 2.1 – Блок-схема алгоритму програми керування

Другою операцією є оновлення показань годинника на дисплеї та стану RGB-індикатора. Годинник оновлюється кожні 500 мс, що забезпечує візуальне мигання роздільника між годинами і хвилинами та актуальне відображення поточного часу. Колір RGB-індикатора встановлюється відповідно до розрахованого рівня ймовірності опадів: зелений колір відповідає низькій ймовірності, синій – помірній, червоний – високій.

Третьою операцією є розрахунок прогнозу опадів на основі аналізу динаміки зміни атмосферного тиску. Алгоритм прогнозування ґрунтується на методі лінійної регресії, що застосовується до масиву з шести послідовних значень тиску, отриманих з інтервалом десять хвилин. За кутовим коефіцієнтом регресійної прямої визначається тенденція зміни тиску, яка перетворюється на числове значення ймовірності опадів у діапазоні від 0 до 100 відсотків. Зниження тиску інтерпретується як підвищення ймовірності опадів, тоді як його зростання свідчить про покращення погодних умов.

Четвертою операцією є обробка натискання кнопки та оновлення зображення на дисплеї відповідно до поточного режиму відображення. Система підтримує п'ять режимів: головний екран із відображенням годинника, дати та поточних показників датчиків, два режими графічного відображення зміни температури (за годину та за добу) і два аналогічні режими для атмосферного тиску. Перемикання між режимами здійснюється одинарним натисканням кнопки, а повернення до головного екрана – утриманням кнопки.

## **2.2 Обґрунтування вибору керуючого мікроконтролера**

Для керуючого пристрою обрано платформу Arduino, яка являє собою інтерактивне апаратно-програмне середовище для розробки електронних пристроїв різного рівня складності. Arduino включає мікроконтролер, що програмується для виконання широкого кола завдань: керування світлодіодами, зчитування даних із сенсорів, управління двигунами тощо. Завдяки простому

інтерфейсу програмування платформа є доступною навіть для початківців [29].

Важливою перевагою Arduino є її відкритість: будь-який користувач може вільно використовувати та змінювати всю наявну документацію, принципи схеми, вихідний код програм та інші матеріали. Це пришвидшує розробку нових пристроїв і сприяє інноваціям, адже учасники спільнот мають змогу працювати над проєктами разом, обмінюватися досвідом та покращувати як програмне, так і апаратне забезпечення.

Arduino широко застосовується для створення проєктів у сферах робототехніки, автоматизації побутових пристроїв, мистецьких інсталяцій тощо. Популярність платформи зумовлена простотою використання, доступністю та великим спектром функціональних можливостей.

Arduino вирізняється універсальністю, що дозволяє реалізовувати різноманітні електронні системи та пристрої. До її конкурентних переваг належать: економічна доступність (низька вартість порівняно з аналогами); кросплатформна сумісність (підтримка операційних систем Windows, Mac OS та інших, на відміну від більшості платформ, орієнтованих на моноплатформні рішення); інтуїтивно зрозуміле середовище розробки, оптимізоване для початківців завдяки великій кількості навчальних матеріалів; а також відкрита архітектура, яка передбачає можливість модифікації програмного забезпечення та апаратних компонентів. Остання властивість робить платформу привабливою для досвідчених розробників, які потребують адаптації системи під специфічні завдання.

Зазначені характеристики забезпечують розширений доступ до електронного прототипування, поєднуючи низький поріг входження з гнучкістю, необхідною для професійного застосування. Відкритість вихідного коду та модульна архітектура обумовлюють еволюційний потенціал платформи, оскільки дозволяють інтегрувати сторонні бібліотеки та апаратні розширення, що, своєю чергою, відкриває можливості для створення спеціалізованих технічних рішень.

Arduino являє собою не просто плату, а цілісну платформу для розробки електронних проєктів. Апаратну основу плат Arduino становлять мікроконтролери Atmel AVR, а також деякі інші типи мікроконтролерів. Плати оснащено вбудованими компонентами, які спрощують процес програмування та інтеграції з периферійними пристроями.

Для забезпечення стабільної роботи більшість плат Arduino мають вбудований лінійний стабілізатор, що видає +5 В або +3,3 В, а також кварцовий резонатор на 16 або 8 МГц для генерування тактового сигналу. Важливою конструктивною особливістю є наявність завантажувача у мікроконтролері: він дозволяє програмувати плату без додаткового зовнішнього програматора, що значно прискорює і спрощує розробку та налагодження проєктів на базі Arduino.

На ранніх етапах розвитку платформи Arduino для програмування використовувався інтерфейс RS-232, що реалізує послідовне з'єднання. Однак у процесі еволюції технологій та відповідно до ринкових вимог новіші версії плат Arduino перейшли на програмування через шину USB.

Використання мікросхеми USB-to-Serial конвертера дає змогу програмувати переважну більшість сучасних плат Arduino через USB-інтерфейс. Наприклад, у платформі Arduino Uno функції такого конвертера виконує мікроконтролер Atmega8. Це, зокрема, надає розробнику можливість змусити операційну систему ідентифікувати плату як мишу, джойстик або інший пристрій залежно від поставлених завдань.

Водночас існують модифікації Arduino, як-от Arduino Mini або неофіційний Boarduino, для програмування яких необхідно використовувати окрему плату USB-to-Serial або спеціальний кабель. Таке конструктивне рішення може бути зумовлене обмеженими габаритами пристрою або специфічними вимогами конкретного проєкту.

Таким чином, еволюція та різноманіття платформ Arduino надають користувачам можливість обирати оптимальний спосіб програмування відповідно до їхніх потреб та умов проєктування.

Платформи Arduino надають можливість задіювати значну кількість виводів мікроконтролера для різноманітних цілей у зовнішніх схемах. Так, плата Decimila має 14 цифрових ліній введення/виведення, із яких 6 здатні генерувати сигнал із широтно-імпульсною модуляцією (ШІМ), а також 6 аналогових входів. Зазначені виводи можуть використовуватися для підключення сенсорів, актуаторів, індикаторів та інших пристроїв.

Сигнали виведено на плату у вигляді контактних площадок або штирьових роз'ємів, що забезпечує зручність їхнього використання та підключення до зовнішніх схем.

Крім того, існують зовнішні плати розширення, відомі як «шилди» (shields), які приєднуються до плати Arduino через штирьові роз'єми. Такі шилди можуть містити різноманітні модулі та компоненти: сенсори, двигуни, дисплеї, Ethernet-порти, бездротові модулі тощо. Вони спрощують розширення функціональних можливостей платформи Arduino та дають змогу швидко й ефективно реалізовувати різноманітні проекти.

Платформи Arduino та сумісні з ними розроблено з урахуванням можливості розширення функціональності пристрою шляхом додавання нових компонентів, які отримали назву «шилди» (shields). Зазначені плати розширення підключаються до Arduino за допомогою спеціальних роз'ємів, передбачених на їхній конструкції. Існує низка стандартизованих плат, що дають змогу конструктивно з'єднувати процесорну плату та плати розширень у стек через спільну шину. Крім того, доступні плати зі зменшеними габаритами (наприклад, Nano, Lilypad), а також спеціальні форм-фактори, призначені для застосування в робототехніці. Можливість розширення дозволяє створювати на базі плат Arduino різноманітні пристрої з широким спектром функціональних можливостей.

На ринку представлено значну кількість датчиків та виконавчих пристроїв, сумісних із платами Arduino. Також доступні набори електромеханічних елементів, спеціально адаптованих для використання з Arduino за допомогою

відповідних драйверних плат. До таких елементів належать двигуни та електромагніти, які можуть бути інтегровані в проекти на базі Arduino.

Для ґрунтового аналізу переваг та конструктивно-функціональних особливостей плати Arduino Nano доцільно здійснити її порівняння з іншими моделями, зокрема Uno, Mega та Due. У таблиці 2.1 наведено деталізовані технічні характеристики кожної з перелічених моделей, що уможливорює їхній детальний розгляд та дозволяє визначити найбільш придатну платформу для реалізації завдань кваліфікаційної роботи.

Таблиця 2.1 – Порівняння характеристик плат Arduino [21]

Характеристика	Arduino Uno	Arduino Nano	Arduino Mega	Arduino Due
Мікроконтролер	ATmega328P	ATmega328P	ATmega2560	SAM3X8E
Пам'ять (флеш)	2 КБ	2 КБ	256 КБ	512 КБ
Пам'ять (SRAM)	0.5 КБ	0.5 КБ	8 КБ	4 КБ
Пам'ять (EEPROM)	1 КБ	1 КБ	512 КБ	4 КБ
Вхідні/вихідні порти	14 (6 ШІМ)	14 (6 ШІМ)	54 (15 ШІМ)	54 (12 ШІМ)
Аналогові входи	6	6	16	12
Цифрові порти	6 (5 ШІМ)	6 (5 ШІМ)	39 (9 ШІМ)	42(12 ШІМ)
ШІМ	6	6	15	12
UART	1	1	3	3
I2C	1	1	1	1
SPI	1	1	1	1
USB	1	1	1	1
Розмір плати	68 x 53 мм	43 x 25 мм	103 x 53 мм	104 x 53 мм

На основі порівняльного аналізу загальних характеристик розглянутих платформ для реалізації проєкту обрано плату Arduino Nano. Нижче наведено детальний опис її технічних параметрів.

Arduino Nano являє собою компактну плату, побудовану на мікроконтролері AtMega328 (рис. 2.2). Функціонально вона подібна до плати Arduino Uno, однак виконана у значно меншому форм-факторі. Попри це, плата є сумісною з макетними платами.

Arduino Nano використовує те саме середовище програмування, що й інші плати цієї платформи, що забезпечує її доступність для користувачів із будь-яким рівнем підготовки. Плата має 8 аналогових входів, 14 цифрових ліній введення/виведення, один ШІМ-вихід та один інтерфейс UART. Такої кількості

портів цілком достатньо для підключення необхідних датчиків, світлодіодів та інших компонентів.

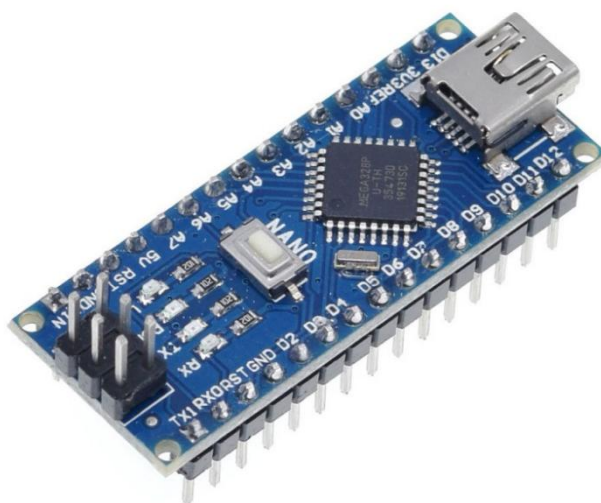


Рисунок 2.2 – Arduino Nano [29]

Основою плати Arduino Nano є мікроконтролер ATmega328P, робоча напруга становить 5 В, а діапазон вхідної напруги – від 7 до 12 В. Загальна кількість цифрових входів/виходів дорівнює 14, з яких шість підтримують широтно-імпульсну модуляцію (ШИМ); аналогових входів – 8. Обсяг Flash-пам'яті складає 32 КБ (з яких 0,5 КБ займає завантажувач), SRAM – 2 КБ, EEPROM – 1 КБ. Тактова частота становить 16 МГц, габаритні розміри – 45×18 мм.

Компактність Arduino Nano уможлиблює вбудовування плати в невеликі проекти; простота програмування та налагодження робить її зручною у використанні. Наявний функціонал задовольняє потреби більшості розробок, а невисока вартість та широка доступність доповнюються великою й активною спільнотою користувачів.

Підключення здійснюється через інтерфейс USB для програмування та живлення. DC-джерело або вивід Vin для зовнішнього живлення напругою 7-12 В. Передбачено виводи заземлення (GND), цифрові та аналогові входи/виходи для підключення відповідних компонентів, а також шини I<sup>2</sup>C та

SPI для приєднання периферійних пристроїв, що працюють за цими протоколами.

### 2.3 Опис складових елементів системи

У якості вимірювального датчика було вибрано BME280. Це комбінований цифровий датчик атмосферного тиску, температури та відносної вологості виробництва компанії Bosch Sensortec, що реалізований за технологією мікроелектромеханічних систем (MEMS). Датчик випускається в надмалому корпусі типу LGA розміром  $2,5 \times 2,5 \times 0,93$  мм (рис. 2.3) і призначений для застосування в портативних та вбудованих системах моніторингу навколишнього середовища, метеостанціях, системах навігації, носимій електроніці та пристроях Інтернету речей [8]. Поєднання трьох вимірювальних каналів в одному корпусі з цифровим виходом робить BME280 одним із найбільш функціональних та широко застосовуваних сенсорів у своєму класі [8].

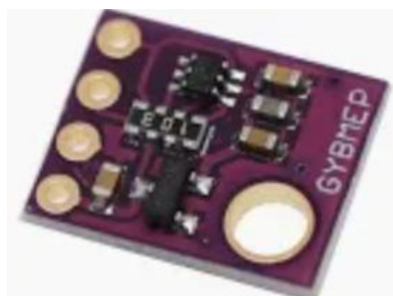


Рисунок 2.3 – BME280 [8]

Канал вимірювання атмосферного тиску реалізований на основі п'єзорезистивного перетворювача. Чутливим елементом є тонка кремнієва мембрана, виготовлена методами мікромашинної обробки. Під дією атмосферного тиску мембрана деформується, що спричиняє зміну електричного опору інтегрованих у неї тензорезисторів відповідно до ефекту п'єзорезистивності. Зміна опору перетворюється на різницю напруг, яка підсилюється та оцифровується вбудованим аналого-цифровим

перетворювачем. Діапазон вимірювання тиску становить 300-1100 гПа, що відповідає висотам від -500 м нижче рівня моря до 9000 м над рівнем моря. Абсолютна похибка вимірювання тиску при температурі 25° С не перевищує  $\pm 1$  гПа, відносна похибка –  $\pm 0,12$  гПа, що забезпечує роздільну здатність за висотою близько 10 см [8].

Канал вимірювання температури використовує вбудований резистивний термометр, інтегрований безпосередньо на кристалі датчика. Вимірювання температури виконується в діапазоні від -40 до +85° С з абсолютною похибкою  $\pm 0,5^\circ$  С у діапазоні 0-65° С та роздільною здатністю 0,01° С. Слід зазначити, що канал температури слугує не лише для безпосереднього вимірювання, але й для внутрішньої компенсації температурної похибки каналів тиску та вологості, оскільки характеристики п'єзорезистивного та ємнісного перетворювачів суттєво залежать від температури кристала [8].

Канал вимірювання відносної вологості реалізований на основі ємнісного перетворювача. Чутливим елементом є конденсатор із полімерною діелектричною плівкою, яка поглинає молекули водяної пари з навколишнього повітря. При зміні вологості змінюється діелектрична проникність плівки, а отже, і електрична ємність конденсатора. Діапазон вимірювання відносної вологості становить 0-100 %, абсолютна похибка –  $\pm 3$  % у діапазоні 20-80 %, час відгуку на зміну вологості близько 1 секунди [8].

Внутрішня архітектура ВМЕ280 включає три аналогові вимірювальні перетворювачі (тиску, температури та вологості), мультиплексований аналого-цифровий перетворювач (АЦП) з надвисокою роздільною здатністю до 20 біт, блок цифрової компенсації та фільтрації, енергонезалежну пам'ять для зберігання індивідуальних калібрувальних коефіцієнтів, а також інтерфейсний блок для зв'язку з мікроконтролером.

Кожен екземпляр датчика в процесі виробництва проходить індивідуальне калібрування, результати якого у вигляді набору числових коефіцієнтів записуються в енергонезалежну пам'ять (ОТР-пам'ять) кристала. При обчисленні компенсованих значень тиску, температури та вологості

мікроконтролер зчитує ці коефіцієнти та використовує їх у розрахунках відповідно до алгоритмів компенсації, наведених у технічній документації виробника. Такий підхід забезпечує стабільність метрологічних характеристик кожного конкретного екземпляра датчика протягом усього терміну його експлуатації [8].

ВМЕ280 підтримує два цифрові інтерфейси зв'язку з мікроконтролером – I2C та SPI, вибір між якими здійснюється апаратно шляхом відповідного підключення виводу CSB (Chip Select Bar).

Інтерфейс I2C функціонує на частоті до 3,4 МГц і підтримує два варіанти апаратної адреси пристрою на шині: 0x76 (якщо вивід SDO підключений до спільного проводу) або 0x77 (якщо SDO підключений до живлення). Можливість вибору адреси дозволяє підключити два датчики ВМЕ280 до однієї шини I2C одночасно. Інтерфейс SPI підтримує режими 00 та 11 і забезпечує швидкість передачі до 10 МГц, що є перевагою при необхідності високошвидкісного опитування датчика [8].

Датчик підтримує три основні режими роботи: режим сну (Sleep Mode), примусовий режим (Forced Mode) та нормальний режим (Normal Mode).

У режимі сну датчик не виконує жодних вимірювань і споживає мінімальний струм близько 0,1 мкА, що робить його придатним для застосування в пристроях з батарейним живленням. У примусовому режимі датчик виконує один цикл вимірювань, після чого автоматично повертається в режим сну; цей режим використовується в системах з нерегулярним опитуванням. У нормальному режимі датчик циклічно чергує активні вимірювання з періодами очікування відповідно до заданих параметрів конфігурації [8].

Для підвищення точності вимірювань і зниження рівня шуму ВМЕ280 підтримує функцію надвибірки (oversampling) для кожного з трьох каналів незалежно. Коефіцієнт надвибірки може приймати значення  $\times 1$ ,  $\times 2$ ,  $\times 4$ ,  $\times 8$  або  $\times 16$ , де більший коефіцієнт забезпечує меншу шумову складову за рахунок збільшення часу вимірювання та енергоспоживання. При коефіцієнті надвибірки

×16 роздільна здатність вимірювання тиску досягає 0,18 Па, що є виключно високим показником для датчиків даного класу [8].

Додатково в датчику реалізований цифровий фільтр IIR (Infinite Impulse Response) із налаштовуваним коефіцієнтом (2, 4, 8 або 16), який застосовується до вимірних значень тиску та температури. Фільтр IIR ефективно усуває короточасні стрибки показань, спричинені механічними коливаннями, порухами повітря або іншими короточасними збуреннями, та забезпечує більш стабільний вихідний сигнал при динамічних змінах умов навколишнього середовища.

Датчик VME280 живиться від напруги в діапазоні 1,71-3,6 В, що забезпечує сумісність як з 3,3 В, так і з 1,8 В системами. При використанні з мікроконтролерними платформами, що працюють на рівні логіки 5 В (зокрема Arduino Nano), необхідне застосування перетворювача рівнів або модульної плати з вбудованим стабілізатором напруги та резисторами підтяжки. Більшість комерційно доступних модулів VME280 вже містять такі елементи і безпосередньо сумісні з Arduino.

Струм споживання в режимі активного вимірювання становить близько 3,6 мкА при частоті вимірювань 1 Гц у типовому режимі роботи. Максимальне споживання при одночасній роботі всіх трьох каналів з максимальним коефіцієнтом надвибірки не перевищує 714 мкА [8]. Такі показники енергоспоживання роблять VME280 придатним для застосування в автономних пристроях з тривалим строком роботи від батареї.

В якості екрана вибрано LCD-дисплей 2004 з модулем шини I2C/IIC (рис. 2.4). Дисплей Arduino 2004 може показувати інформацію у 20 символах, які розміщуються на чотири рядки.

Під час підключення графічного дисплея використовується модуль I2C, який значно спрощує підключення і водночас використовує лише 4 пін для під'єднання. Два використовуються для живлення і два для передавання даних по шині I2C (SDA та SCL).



Рисунок 2.3 – Рідкокристалічний дисплей LCD2004 [30]

Параметри LCD-дисплея 2004:

- LCD-контролер: HD44780;
- 20 символів;
- 4 рядки;
- напруга живлення: 5 В;
- висота 60 мм;
- ширина 98 мм.

Основна відмінність даного дисплея від 1602 це більша робоча область, 20×4 символів замість 16×2, що дозволяє відобразити більше інформації одночасно. Решта характеристик: контролер HD44780, інтерфейс I2C, напруга живлення, залишаються ідентичними, що забезпечує повну сумісність на рівні коду та бібліотек.

## РОЗДІЛ 3

### ПРАКТИЧНА РЕАЛІЗАЦІЯ МІКРОКОНТРОЛЕРНОЇ СИСТЕМИ

#### 3.1 Проектування електричної схеми пристрою

Для проектування електричної схеми пристрою та подальшої симуляції його роботи було використано онлайн-сервіс Wokwi, доступний за адресою [wokwi.com](http://wokwi.com). Wokwi є сучасною спеціалізованою вебплатформою для моделювання та симуляції електронних проєктів на базі мікроконтролерів, що функціонує безпосередньо у веббраузері без необхідності встановлення додаткового програмного забезпечення на комп'ютері користувача [31]. Платформа набула широкого розповсюдження серед розробників вбудованих систем, студентів та дослідників завдяки доступності, інтуїтивному інтерфейсу та розвиненій функціональності.

Сервіс орієнтований на розробку та тестування проєктів на базі найпоширеніших мікроконтролерних платформ, зокрема Arduino Uno, Arduino Nano, Arduino Mega, ESP32, ESP8266 та Raspberry Pi Pico. Підтримка широкого спектру платформ робить Wokwi універсальним інструментом, придатним як для навчальних цілей, так і для прототипування реальних пристроїв у професійній розробці. Суттєвою перевагою платформи є те, що симуляція виконується на стороні сервера в режимі реального часу, що забезпечує достовірну відтворюваність поведінки фізичного мікроконтролера, включаючи таймери, переривання та апаратні інтерфейси.

Робочий процес у середовищі Wokwi передбачає створення електронної схеми шляхом додавання компонентів із вбудованої бібліотеки елементів та встановлення електричних з'єднань між ними, написання керуючої програми мовою C++ в інтегрованому редакторі коду, а також запуск симуляції та спостереження за роботою змодельованої системи в реальному часі. Такий підхід суттєво скорочує час проектування та дозволяє виявляти й усувати схемотехнічні та програмні помилки ще на етапі розробки, до виготовлення фізичного прототипу. Це є особливо цінним при розробці вбудованих систем зі складною

взаємодією апаратних компонентів, де помилки монтажу можуть призводити до пошкодження елементів.

Бібліотека компонентів платформи охоплює широкий перелік електронних елементів: датчики температури та вологості DHT11 і DHT22, датчики тиску BMP180 і BME280, LCD-дисплеї з інтерфейсом I2C та паралельним підключенням, OLED-дисплеї, матричні клавіатури, кнопки, світлодіоди, RGB-світлодіоди, реле, серводвигуни, крокові двигуни, модулі RFID та інші широко застосовувані компоненти. Підтримується симуляція передачі даних за цифровими протоколами I2C, SPI та UART, що уможливорює повноцінне тестування систем із складною периферією та багаторівневою взаємодією компонентів. Автоматичне підключення бібліотек Arduino, зазначених директивою `#include` у коді програми, усуває необхідність ручного налаштування залежностей і додатково спрощує процес розробки.

До ключових функціональних можливостей платформи Wokwi належать такі. Симуляція роботи схеми виконується в режимі реального часу з відображенням актуального стану кожного компонента, включаючи показання дисплеїв, стан світлодіодів та положення серводвигунів. Вбудовані засоби налагодження включають монітор послідовного порту для виведення діагностичних повідомлень програми та логічний аналізатор для дослідження цифрових сигналів на виводах мікроконтролера. Параметри більшості компонентів піддаються гнучкому налаштуванню – зокрема, можна задавати I2C-адресу дисплея, початкове значення датчика, опір резистора тощо. Функція збереження проєктів у хмарному сховищі та генерації посилання для спільного доступу дозволяє організувати колективну роботу кількох розробників над одним проєктом, що є зручним у навчальному процесі та при дистанційній співпраці.

Характерною архітектурною особливістю сервісу Wokwi є використання файлу конфігурації `diagram.json` як основного засобу опису топології схеми. У цьому файлі в структурованому форматі JSON зберігаються відомості про всі компоненти схеми – їх тип, ідентифікатор, координати на робочій площині та

значення налаштувань, а також повний перелік електричних з'єднань між виводами компонентів. Саме на основі вмісту файлу `diagram.json` платформа формує графічне представлення схеми та визначає електричну топологію симульованого пристрою. Файл генерується автоматично в процесі візуального редагування схеми методом перетягування компонентів («drag-and-drop») та встановлення з'єднань між ними, однак може також редагуватися вручну в текстовому режимі. Можливість прямого редагування файлу `diagram.json` надає досвідченим розробникам додаткову гнучкість: зокрема, дозволяє швидко тиражувати однотипні компоненти, програмно генерувати схеми або переносити конфігурацію між різними проектами. Вміст файлу `diagram.json` для спроектованої схеми розроблюваного пристрою наведено у додатку Б.

Електрична схема зібрана у сервісі Wokwi зображена на рисунку 3.1.

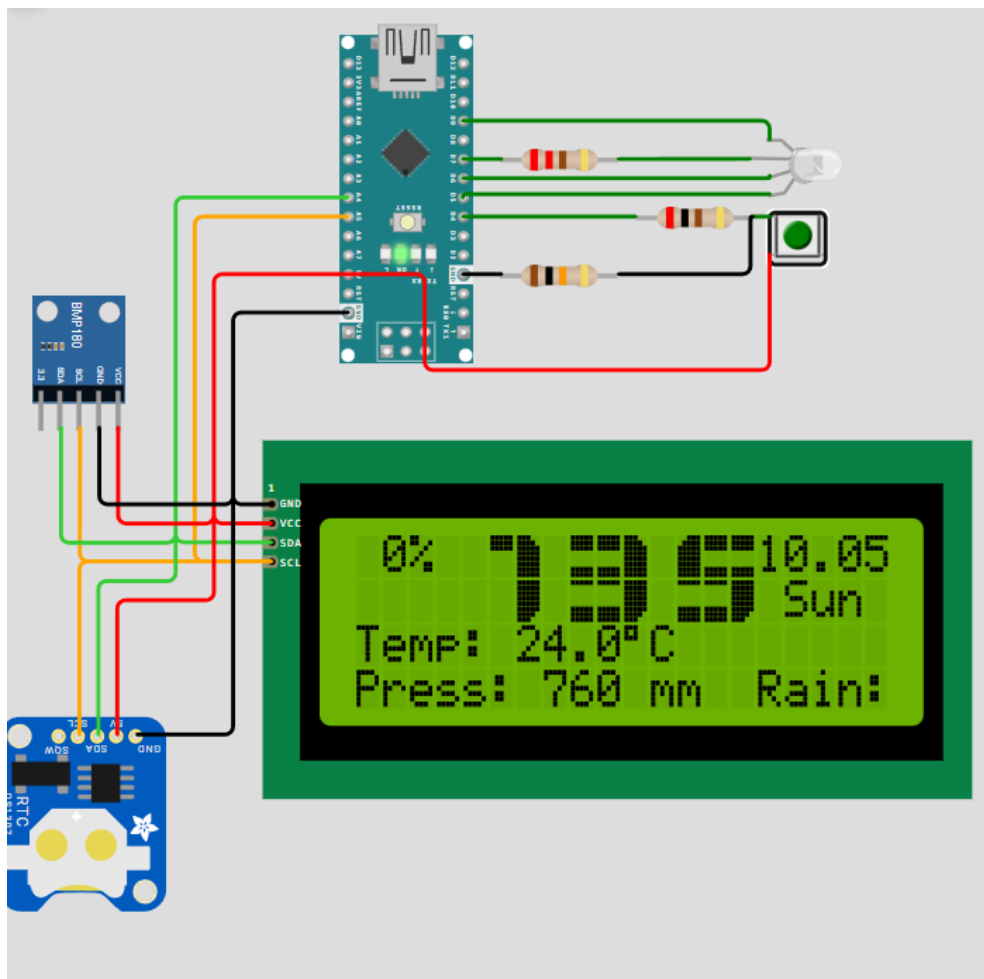


Рисунок 3.1 – Електрична схема у сервісі Wokwi

У даній схемі елементи з'єднані між собою згідно таблиці 3.1.

Таблиця 3.1 – З'єднання елементів схеми

Найменування елемента	Найменування контакту	Найменування елемента	Найменування контакту
1	2	3	4
Arduino	GND	BME280	GND
Arduino	3.3V	BME280	VCC
Arduino	A4	BME280	SDA
Arduino	A5	BME280	SCL
Arduino	GND	LCD	GND
Arduino	5V	LCD	VCC
Arduino	A4	LCD	SDA
Arduino	A5	LCD	SCL
Arduino	4	Кнопка	S
Arduino	GND	Кнопка	GND
Arduino	5	RGB LED	B (синій)
Arduino	6	RGB LED	G (зелений)
Arduino	7	RGB LED	COM
Arduino	9	RGB LED	R (червоний)
Arduino	A0	Фоторезистор	Вихід
Arduino	GND	Фоторезистор	GND

## 3.2 Виготовлення пристрою

Корпус пристрою був спроектований та в подальшому роздрукований на 3D-принтері. Такий метод виготовлення дозволив отримати корпус відповідного розміру та із відповідними отворами.

Кріплення компонентів до корпусу здійснювалось за допомогою гвинтового з'єднання, а в окремих випадках, де конструктивні особливості не дозволяли застосувати гвинти, використовувався термоклей. З метою спрощення процесу електричного монтажу компоненти встановлювались без виготовлення друкованої плати та з'єднувались між собою монтажними провідниками відповідно до таблиці 3.1.

Корпус пристрою був спроектований у середовищі параметричного 3D-моделювання FreeCAD. Це середовище дозволяє створювати точні об'ємні моделі з урахуванням габаритних розмірів усіх компонентів, що розміщуються всередині, а також формувати необхідні конструктивні елементи – отвори для

виведення роз'ємів, кнопок керування, дисплея та вентиляційні прорізи для забезпечення теплообміну з навколишнім середовищем.

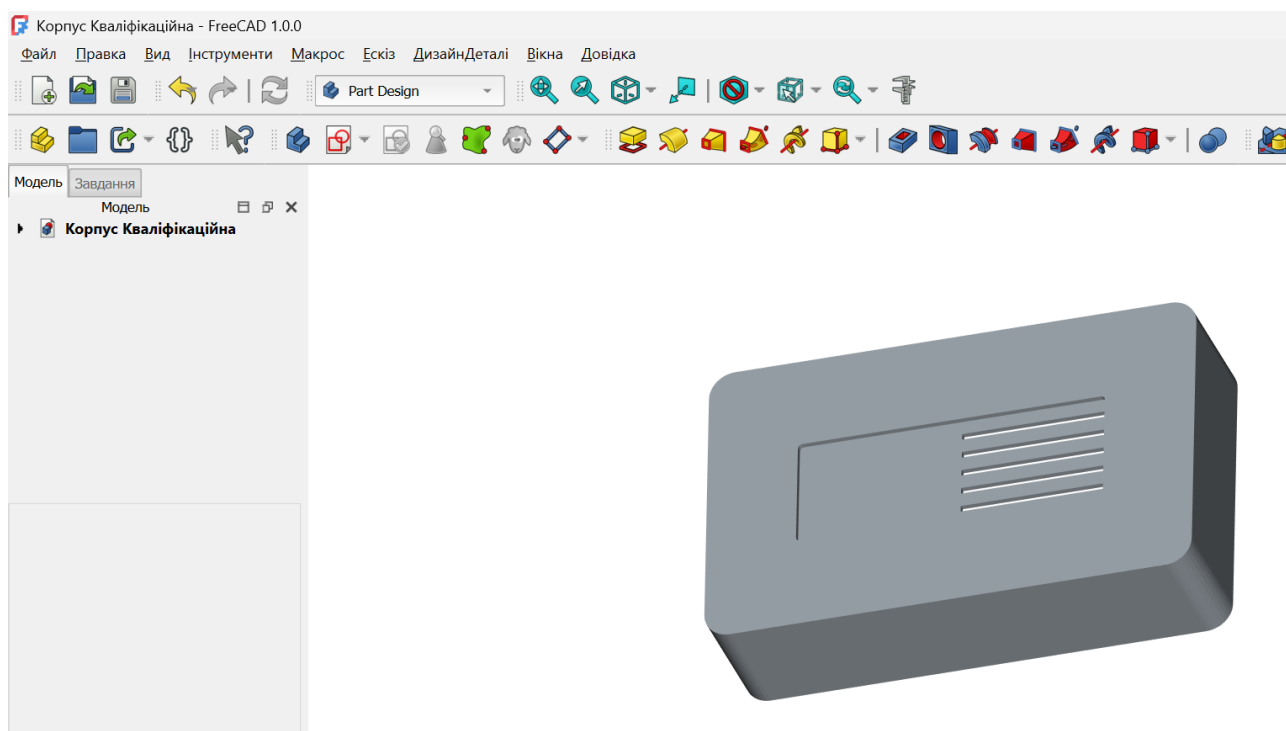


Рисунок 3.2 – 3D-модель корпусу пристрою у середовищі FreeCAD

При проектуванні корпусу враховувалося розташування всіх електронних компонентів системи. Для кожного з елементів у корпусі передбачено відповідні посадкові місця та монтажні отвори, що забезпечують надійну фіксацію компонентів та зручний доступ до органів керування і з'єднувачів.

Виготовлення корпусу здійснювалось методом пошарового наплавлення (FDM) на 3D-принтері з використанням пластику PETG (рис. 3.3). Цей метод виготовлення дозволив отримати корпус точно заданого розміру з усіма необхідними отворами та конструктивними елементами без застосування складного механічного обладнання. Перевагою адитивного виробництва є можливість швидкого внесення змін до конструкції та повторного друку у разі необхідності доопрацювання.

Монтаж електронних компонентів виконувався методом паяння з використанням каніфольно-флюсового припою. Усі електричні з'єднання між

елементами схеми реалізовано гнучкими монтажними провідниками перерізом 0,25-0,5 мм<sup>2</sup>, що забезпечило надійний електричний контакт та необхідну механічну гнучкість при розміщенні компонентів у корпусі.



Рисунок 3.3 – Готовий надрукований корпус пристрою

На першому етапі монтажу до мікроконтролерної плати Arduino Nano припаювались провідники, що з'єднують її з датчиком ВМЕ280 по шині I2C (виводи SDA та SCL), а також лінії живлення та заземлення. Датчик ВМЕ280 розміщувався таким чином, щоб забезпечити його максимальну теплову ізоляцію від інших компонентів схеми, що нагріваються в процесі роботи, – зокрема від мікроконтролера та стабілізатора напруги. Це дозволяє мінімізувати похибку вимірювання температури, спричинену тепловим впливом суміжних елементів.

На наступному етапі виконувалось підключення LCD-дисплея з I2C-адаптером, RGB-світлодіодного індикатора, фоторезистора та сенсорної

кнопки керування відповідно до принципової електричної схеми пристрою. LCD-дисплей підключається до тієї ж шини I2C, що й датчик BME280, що дозволило суттєво скоротити кількість задіяних виводів мікроконтролера.

Живлення пристрою реалізовано від зовнішнього блока живлення з вихідною напругою 5 В, підключеного через стандартний роз'єм до входу живлення мікроконтролерної плати Arduino Nano. Стабілізатор напруги, вбудований у плату Arduino Nano, забезпечує формування необхідних рівнів живлення для всіх компонентів системи: напруга 5 В подається на LCD-дисплей та RGB-індикатор, напруга 3,3 В на датчик BME280.

Після завершення монтажу всі компоненти розміщувались у корпусі та фіксувались у передбачених посадкових місцях. LCD-дисплей встановлювався у відповідний виріз передньої панелі корпусу (рис. 3.4). Готовий пристрій перевірявся на відсутність короткого замикання та правильність монтажних з'єднань перед першим увімкненням.



Рисунок 3.4 – Зовнішній вигляд пристрою

### 3.3 Створення програми керування пристроєм

Написання програми відбувалось у середовищі Arduino IDE на мові програмування C++. Блок-схема алгоритму програми наведена на рисунку 2.1.

При написанні програми було використано чотири бібліотеки: Wire.h, LiquidCrystal\_I2C.h, RTCLib.h та Adafruit\_BMP085.h. Бібліотека Wire.h забезпечує роботу з інтерфейсом I2C та є базовою для взаємодії з усіма підключеними пристроями. Бібліотека LiquidCrystal\_I2C.h призначена для керування LCD-дисплеєм через інтерфейс I2C. Бібліотека RTCLib.h забезпечує роботу з модулем годинника реального часу DS3231, зокрема зчитування та встановлення поточного часу і дати. Бібліотека Adafruit\_BMP085.h реалізує взаємодію з датчиком атмосферного тиску та температури BME280, включаючи ініціалізацію датчика та зчитування вимірювальних даних.

На початку коду виконується ініціалізація LCD-дисплея, модуля RTC та датчика BME280 (лістинг 3.1).

#### Лістинг 3.1 – Ініціалізація компонентів системи

---

```
LiquidCrystal_I2C lcd(0x27, 20, 4);  
RTC_DS1307 rtc;  
Adafruit_BMP085 bmp;
```

---

кінець лістингу 3.1

LCD-дисплей типу 2004 з I2C-адресою 0x27 ініціалізується через об'єкт lcd з параметрами 20 стовпців та 4 рядки. Об'єкт rtc використовується для роботи з модулем годинника реального часу. Об'єкт bmp забезпечує взаємодію з датчиком BMP180 для отримання значень температури та атмосферного тиску.

У функції setup() виконується послідовна ініціалізація всіх апаратних компонентів системи (лістинг 3.2).

#### Лістинг 3.2 – Функція setup()

---

```
lcd.init();  
lcd.backlight();  
bmp.begin();
```

---

```
rtc.begin();
if (RESET_CLOCK || !rtc.isrunning()) {
    rtc.adjust(DateTime(F(__DATE__), F(__TIME__)));
}
```

---

кінець лістингу 3.2

Виконується ініціалізація дисплея та вмикається підсвічування. Датчик BME280 та модуль RTC запускаються викликами відповідних методів. У разі якщо модуль RTC не запущено або встановлено прапорець RESET\_CLOCK, час автоматично встановлюється відповідно до моменту компіляції програми за допомогою макросів \_\_DATE\_\_ та \_\_TIME\_\_. Після завершення ініціалізації на дисплеї відображається головний екран із поточним часом, датою та показниками датчиків.

Зчитування даних із датчика BME280 реалізовано у функції readSensors() (лістинг 3.3).

#### Лістинг 3.3 – Функція readSensors()

---

```
void readSensors() {
    dispTemp = bmp.readTemperature();
    dispPres = bmp.readPressure() * 0.00750062;
}
```

---

кінець лістингу 3.3

Функція зчитує поточне значення температури та атмосферного тиску з датчика BMP180. Отримане значення тиску перераховується з паскалів у міліметри ртутного стовпа шляхом множення на коефіцієнт 0,00750062 та зберігається у відповідній змінній для подальшого відображення та аналізу.

Алгоритм прогнозування опадів реалізовано в межах функції plotSensorsTick(), що викликається у кожній ітерації головного циклу (лістинг 3.4).

#### Лістинг 3.4 – Розрахунок прогнозу опадів

---

```
float a = (6.0 * sumXY - sumX * sumY) /
    (6.0 * sumX2 - sumX * sumX);
int delta = a * 6;
```

```
dispRain = map(delta, -250, 250, 100, -100);  
dispRain = constrain(dispRain, 0, 100);
```

---

кінець лістингу 3.4

Кожні десять хвилин виконується усереднення десяти вимірювань тиску та додавання отриманого значення до масиву з шести точок. На основі цього масиву методом лінійної регресії обчислюється кутовий коефіцієнт тренду зміни тиску. Від'ємне значення коефіцієнта свідчить про зниження тиску і інтерпретується як підвищення ймовірності опадів. Отримане значення перетворюється функцією `map()` у відсоток ймовірності опадів у діапазоні від 0 до 100 % та обмежується функцією `constrain()` для виключення виходу за межі допустимого діапазону.

Відображення інформації на LCD-дисплеї реалізовано у функції `drawSensors()` (лістинг 3.5).

#### Лістинг 3.5 – Функція `drawSensors()`

---

```
void drawSensors() {  
  lcd.setCursor(0, 2);  
  lcd.print("Temp: ");  
  lcd.print(dispTemp, 1);  
  lcd.write(223);  
  lcd.print("C ");  
  lcd.setCursor(0, 3);  
  lcd.print("Press: ");  
  lcd.print(dispPres);  
  lcd.print(" mm Rain: ");  
  lcd.print(dispRain);  
  lcd.print("%");  
}
```

---

кінець лістингу 3.5

Функція виводить на третій рядок дисплея поточне значення температури з точністю до одного десяткового знака та символ градуса Цельсія. На четвертому рядку відображаються значення атмосферного тиску в міліметрах ртутного стовпа та розрахована ймовірність опадів у відсотках. Перемикання між режимами відображення – головним екраном та графіками зміни температури і

тиску за годину та добу – здійснюється натисканням сенсорної кнопки, підключеної до виводу 4 мікроконтролера.

### **3.4 Опис та тестування розробленої системи**

Розроблений пристрій забезпечує вимірювання та відображення трьох кліматичних параметрів – температури, відносної вологості та атмосферного тиску і може працювати у п'яти режимах відображення інформації: головний екран, графік температури за годину, графік температури за добу, графік тиску за годину та графік тиску за добу.

Для живлення пристрою використовується зовнішній блок живлення з вихідною напругою 5 В та максимальним вихідним струмом не менше 500 мА, підключений до роз'єму мікроконтролерної плати Arduino Nano. Після подачі живлення система автоматично виконує ініціалізацію всіх компонентів – датчика BME280, модуля RTC та LCD-дисплея. У разі успішної ініціалізації на дисплеї відображається головний екран із поточним часом, датою та показниками датчиків. Якщо під час ініціалізації виявлено несправність одного з компонентів, на дисплеї з'являється відповідне повідомлення про помилку та виконання програми зупиняється.

У режимі головного екрана на дисплеї відображається поточний час у форматі великих цифр у верхній частині екрана, поточна дата та день тижня у правому верхньому куті, а також значення температури, атмосферного тиску та відсоток ймовірності опадів у нижніх рядках дисплея. Годинник оновлюється кожні 500 мс, показники датчиків – кожні 30 секунд. Колір RGB-індикатора змінюється залежно від розрахованого прогнозу: зелений відповідає низькій ймовірності опадів (менше 30 %), синій – помірній (30-70 %), червоний – високій (понад 70 %).

Перемикання між режимами відображення здійснюється натисканням сенсорної кнопки. Кожне одинарне натискання переводить систему в наступний режим у циклічній послідовності: головний екран графік температури за годину

графік температури за добу графік тиску за годину графік тиску за добу головний екран. Утримання кнопки повертає систему до головного екрана з будь-якого режиму.

У режимах відображення графіків на дисплеї виводиться стовпчаста діаграма зміни відповідного параметра, побудована на основі масиву з 15 точок. Годинний графік оновлюється кожні чотири хвилини, добовий – кожні 1,6 години. У правій частині дисплея відображаються максимальне, поточне та мінімальне значення параметра за обраний період.

Яскравість підсвічування дисплея регулюється автоматично відповідно до рівня освітленості приміщення на основі сигналу з фоторезистора, підключеного до аналогового входу мікроконтролера. Це дозволяє забезпечити комфортне відображення інформації як у яскраво освітленому приміщенні, так і в умовах слабого освітлення.

У процесі тестування системи було перевірено коректність відображення часу та дати, точність вимірювання температури та тиску шляхом порівняння з показниками еталонного термометра та барометра, а також працездатність алгоритму прогнозування опадів. Встановлено, що похибка вимірювання температури становить до  $0,5^{\circ}\text{C}$ , що зумовлено тепловим впливом електронних компонентів на датчик при його розміщенні всередині корпусу. Похибка вимірювання атмосферного тиску не перевищує 1 гПа, що відповідає технічним характеристикам датчика BME280.

## ВИСНОВКИ

В ході виконання кваліфікаційної роботи здійснено комплексний аналіз предметної області моніторингу кліматичних параметрів навколишнього середовища.

Розглянуто методи та засоби вимірювання таких параметрів, а також методи прогнозування опадів на основі аналізу динаміки зміни атмосферного тиску.

Виконано порівняльний аналіз існуючих комерційних та аматорських систем моніторингу мікроклімату, що дозволило визначити їх переваги та недоліки і сформулювати технічні вимоги до власної розробки, зокрема низьку вартість, компактність і функціональну повноту.

Обґрунтовано вибір елементної бази системи. Спроектовано принципову електричну схему пристрою та розроблено конструктив корпусу з подальшим виготовленням методом 3D-друку.

Розроблено програмне забезпечення мікроконтролерної системи мовою C++ у середовищі Arduino IDE. Реалізовано зчитування та обробку даних, а також алгоритм прогнозування опадів на основі методу лінійної регресії за шістьма послідовними значеннями тиску.

Виготовлено працюючу модель системи вимірювання кліматичних параметрів та прогнозування опадів та проведено її тестування. За результатами тестування підтверджено працездатність системи в цілому.

Розроблена система є економічно доступним і практично ефективним рішенням для моніторингу мікроклімату, яке може застосовуватись у побутових умовах, навчальному процесі та дослідницьких проєктах. Завдяки модульній архітектурі система відкрита для подальшого розширення функціональності. Зокрема, перспективними напрямками розвитку є реалізація бездротової передачі даних за протоколами Wi-Fi або Bluetooth.

## ПЕРЕЛІК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Гігієна та екологія : підручник / В. Г. Бардов та ін. Вінниця : Нова Кн., 2022. 472 с.
2. Курепін В. М., Марченко Д. Д., Курепін Д. В. Охорона праці в галузі : навч. посіб. Миколаїв : МНАУ, 2023. 586 с.
3. Пашко К. О., Кашуба М. О., Лотоцька О. В. Гігієна та екологія : підручник. Тернопіль : ТДМУ, 2022. 629 с.
4. Державні санітарні норми мікроклімату виробничих приміщень : ДСН 3.3.6.042-99. Київ : МОЗ України, 1999. 16 с.
5. Охорона праці в медичній галузі : підручник / О. П. Яворовський та ін. Київ : Медицина, 2022. 488 с.
6. World Meteorological Organization. Guide to Instruments and Methods of Observation. Volume I : Measurement of Meteorological Variables / WMO. Geneva : WMO, 2022.
7. Measurement and Instrumentation : Theory and Application. A. S. Morris et al. 3rd ed. Amsterdam : Academic Press (Elsevier), 2022. 690 p.
8. Bosch Sensortec. BME280 – Combined Humidity and Pressure Sensor : Datasheet. Document revision 1.23 / Bosch Sensortec GmbH. Reutlingen, 2022. 57 p.
9. Handbook of Metrology and Applications. D. K. Aswal, et al. Singapore : Springer, 2023. 2442 p.
10. Урок 15 Механічні і теплові фізичні явища. Освітній проект «На Урок» для вчителів. URL: <https://naurok.com.ua/urok-15-mehanichni-i-teplovi-fizichni-yavischa-202584.html> (дата звернення: 14.03.2026).
11. Мій Проект. URL: <https://myproject.com.ua/gy-bme280-datchik-visotomir-barometr-ua.html> (дата звернення: 15.03.2026).
12. Kuzubasoglu B. A. Recent Studies on the Humidity Sensor : A Mini Review . ACS Applied Electronic Materials. 2022. Vol. 4, No. 10. P. 4797-4807.

13. Гігрометр психрометричний ВІТ-1. Lfood. URL: <https://lfood.com.ua/gigrometr-psyhrometrychnyj-vit-1-tu-3-ukrayiny-14307481-001-92-100959> (дата звернення: 16.03.2026).
14. World Meteorological Organization. Guide to Instruments and Methods of Observation. Volume I : Measurement of Meteorological Variables WMO. Geneva : WMO, 2022. P. 198-45.
15. Зміна атмосферного тиску. Дослід Торрічеллі. Ртутний барометр. Фізика, 7 клас НУШ. «МійКлас». URL: <https://www.miyklas.com.ua/p/fzika/7-klas/tisk-tverdikh-til-ridin-i-gaziv-16558/atmosfernii-tisk-doslid-torichelli-barometri-16565/re-33993a2f-a357-40d1-9fcb-7821d556f044> (дата звернення: 05.04.2026).
16. Основи сенсорики. Тензосенсори. Загальні відомості та принцип роботи - online presentation. ppt Online - display PPT presentation online. URL: <https://en.ppt-online.org/1637134> (дата звернення: 10.03.2026).
17. Shou S., Li S. Synoptic Meteorology : Fundamentals of Weather Analysis and Forecasting. Singapore : Springer, 2023. 390 p.
18. Rietveld T. Weather Station using Arduino and BME280 : Pressure-based Forecasting Algorithm. *Open Electronics Journal*. 2023. Vol. 4. P. 12-21.
19. Milrad S. Synoptic Analysis and Forecasting: An Introductory Toolkit. 2nd ed. Amsterdam : Elsevier, 2025.
20. An open workflow to gain insights about low-likelihood high-impact weather events from initialized predictions / T. Kelder et al. *Meteorological Applications*. 2022. Vol. 29, no. 3. 2065 p.
21. Arduino. Bitkit. URL: <https://bitkit.com.ua/shho-take-arduino?srsId=AfmBOoorWQ02ALxOB3ydopWbQYOfQwhsKz7H8NaMTKUkygrkAOKxRL-U> (date of access: 05.04.2026).
22. Oregon Scientific. BAR208HG Wireless Weather Station. URL: <https://www.oregonscientific.com> (дата звернення: 13.05.2026).
23. Netatmo. Weather Station User Guide. Netatmo SAS. Paris, 2022. 32 p.
24. Vaisala O. Indigo500 Series Transmitters Indigo510, Indigo520 : User Guide. M212287EN-N. Helsinki, 2022. 116 p.

25. Donskytech. Arduino BME280 Weather Station Dashboard. Hackster.io. 2022. URL: <https://www.hackster.io/donskytech/arduino-bme280-weather-station-dashboard-b7a15d> (дата звернення: 11.03.2026).

26. Pavleski M. DIY Zambretti Weather Forecaster on VFD Display Hackster.io. 2021. URL: <https://www.hackster.io/mircemk/diy-zambretti-weather-forecaster-on-vfd-display-ddd069> (дата звернення: 13.04.2026).

27. Mufte K. IoT Weather Station with ESP8266 and BME280. Hackster.io. 2021. URL: <https://www.hackster.io/karimmufte/iot-weather-station-with-esp8266-and-bme280> (дата звернення: 03.04.2026).

28. Захаренко В. І., Бойко О. М. Система бездротового моніторингу мікроклімату навчальних приміщень на базі ESP32. Вісник Національного університету «Львівська політехніка». Серія: Комп'ютерні науки та інформаційні технології. 2022. № 1(11). С. 45-53.

29. Arduino Nano V3.0 AVR ATmega328P з розпаяними роз'ємами. URL: <https://arduino.ua/prod166-arduino-nano-v3-0-avr-atmega328p-s-raspayannimi-razemami> (дата звернення: 03.04.2026).

30. LCD 2004 I2C символний дисплей 20x4. URL: <https://arduino.ua/prod663-lcd-2004-i2c-simvolnii-displei-20x4-sinii?srsltid=AfmBOorZBuQ3-NOi9oqgm4jxN2dqdMkypIT97q8q4BZmQzcMXLI6Nz0P> (дата звернення: 15.03.2026).

31. Wokwi - World's most advanced ESP32 Simulator. Wokwi. URL: <https://wokwi.com/> (date of access: 24.04.2026).