

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

ДОПУЩЕНО ДО ЗАХИСТУ

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

_____Ірина ЖУРАВСЬКА

«__» _____ 2025 р.

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА
НА ЗДОБУТТЯ ОСВІТНЬОГО СТУПЕНЯ БАКАЛАВРА
GardenSens – автоматизована система моніторингу
мікроклімату на базі Arduino

Спеціальність 123 Комп'ютерна інженерія

Освітня програма «Комп'ютерна інженерія»

Здобувач

_____Олександр ПЕТРЕНКО

підпис

«__» _____ 2025 р.

Керівник к.т.н., доцент каф. КІ

_____Ярослав КРАЙНИК

підпис

«__» _____ 2025 р.

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

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри комп'ютерної інженерії

Ірина ЖУРАВСЬКА

«_____» _____ 2024 р.

ЗАВДАННЯ на кваліфікаційну роботу здобувача

Петренка Олександра Олексійовича

(прізвище, ім'я, по батькові здобувача)

1. Тема кваліфікаційної роботи

GardenSens – автоматизована система моніторингу мікроклімату на базі Arduino.

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

2. Строк представлення кваліфікаційної роботи «_____» _____ 2025 р.

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

Очікуваним результатом є створення прототипу системи GardenSens для моніторингу та автоматичного керування мікрокліматом у теплиці. Пристрій має зчитувати температуру, вологість і рівень CO₂, відображати дані на дисплеї та керувати виконавчими елементами відповідно до заданих режимів. Реалізовано кілька сценаріїв роботи, зокрема сенсорний, таймерний, PID-регулювання та імітацію світанку. Система працює автономно, підтримує живлення від акумулятора та зберігає налаштування в EEPROM. Початковими даними є нормативи мікроклімату, технічні характеристики компонентів та результати тестування.

4. Перелік питань, що підлягають розробці:

- аналіз сучасних систем моніторингу мікроклімату теплиць;
- вибір апаратної платформи та сенсорів для збору кліматичних даних;
- розробка схеми підключення та енергозабезпечення системи;
- програмна реалізація режимів керування та збереження параметрів;
- створення інтерфейсу користувача для налаштувань і відображення даних;

– тестування прототипу та оцінка ефективності його роботи.

5. Перелік графічних матеріалів

Презентація (блок-схема логіки роботи системи, схема підключення компонентів пристрою, скріншоти інтерфейсу користувача (OLED-дисплей), діаграми з результатами тестування, фото зібраного пристрою)

6. Консультанти:

Консультант	Кафедра (організація)	Частина роботи

Керівник роботи

Особистий підпис

Ярослав КРАЙНИК

Власне ім'я ПРИЗВИЩЕ

Здобувач

Особистий підпис

Олександр ПЕТРЕНКО

Власне ім'я ПРИЗВИЩЕ

Дата видачі завдання «_____» _____ 2024 р.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

виконання кваліфікаційної бакалаврської роботи

Тема: GardenSens – автоматизована система моніторингу мікроклімату на базі Arduino

№	Найменування роботи	Початок	Закінчення	Примітки
1	Розробка та затвердження завдання на виконання КБР	09.10.2024	30.10.2024	Виконано
2	Огляд літературних джерел та аналіз готових рішень у сфері моніторингу мікроклімату	21.02.2025	08.03.2025	Виконано
3	Складання календарного плану КБР	28.04.2025	02.05.2025	Виконано
4	Аналіз вимог до умов вирощування в теплиці та постановка технічного завдання	02.05.2025	09.05.2025	Виконано
5	Вибір компонентів, розробка схеми підключення та опис апаратної частини системи	10.05.2025	15.05.2025	Виконано
6	Розробка програмної частини: написання коду, інтеграція сенсорів,	16.05.2025	24.05.2025	Виконано
7	Моделювання, складання прототипу GardenSens, початкове тестування	25.05.2025	31.05.2025	Виконано
8	Відгук керівника КБР	05.06.2025	06.06.2025	Виконано
9	Оформлення КБР та презентації	03.05.2025	07.06.2025	Виконано
10	Попередній захист	21.05.2025	04.06.2025	Виконано
11	Рецензування	16.06.2025	17.06.2025	Виконано
12	Завершення оформлення КБР та презентації	10.06.2025	16.06.2025	Виконано
13	Захист кваліфікаційної бакалаврської роботи	24.06.2025	24.06.2025	Виконано

Керівник роботи

Особистий підпис

Ярослав КРАЙНИК
Власне ім'я **ПРИЗВИЩЕ**

Здобувач

Особистий підпис

Олександр ПЕТРЕНКО
Власне ім'я **ПРИЗВИЩЕ**

« ____ » _____ 2025 р.

АНОТАЦІЯ

до кваліфікаційної бакалаврської роботи

«GardenSens – автоматизована система моніторингу мікроклімату на базі Arduino»

Студент 405 гр.: Петренко Олександр Олексійович

Керівник: к. т. н., доцент Ярослав Михайлович Крайник

У роботі розглянуто процес розробки прототипу пристрою для моніторингу температурного режиму в умовах складського приміщення з метою забезпечення оптимальних умов зберігання продукції. Актуальність теми зумовлена необхідністю впровадження недорогих і надійних рішень для автоматизованого контролю мікроклімату в складських комплексах малого та середнього бізнесу.

Об'єкт дослідження – мікроконтролерні системи автоматизованого моніторингу.

Предмет дослідження – технології збору, обробки та передачі даних температурного контролю на базі Arduino.

Метою роботи є створення доступного та ефективного пристрою, здатного в режимі реального часу контролювати температуру повітря, відображати інформацію на дисплеї та передавати сповіщення при перевищенні критичних параметрів.

Розроблений пристрій побудований на базі плати Arduino Pro Mini та використовує цифровий температурний сенсор DS18B20. Виведення даних реалізовано через OLED-дисплей, а GSM-оповіщення забезпечується модулем SIM800L. Реалізовано функцію реагування на вхідний дзвінок для віддаленого отримання актуальної інформації.

Практична значимість проєкту полягає в можливості застосування пристрою для моніторингу умов зберігання продуктів, медикаментів та технічних матеріалів. Наукова новизна полягає в адаптації доступного мікроконтролера до автономної роботи з енергозбереженням, простим інтерфейсом і налаштуванням порогів. Робота апробована в умовах, що моделюють складське середовище.

Пояснювальна записка КБР складається зі вступу, чотирьох основних розділів, висновків, списку використаних джерел та трьох додатків. У роботі послідовно розглядаються теоретичні та практичні аспекти створення автоматизованої системи моніторингу мікроклімату для складських приміщень.

У вступі обґрунтовано актуальність теми, визначено мету та завдання роботи, охарактеризовано об'єкт і предмет дослідження, а також окреслено практичну значущість запропонованого рішення.

У першому розділі подано огляд сучасних технологій моніторингу, проведено порівняльний аналіз існуючих систем, визначено їх переваги та недоліки, а також обґрунтовано доцільність вибору власної архітектури системи GardenSens.

У другому розділі детально описано апаратну частину пристрою: обрані мікроконтролери, сенсори, виконавчі механізми, модулі живлення, дисплей та елементи управління. Наведено їх технічні характеристики та принципи взаємодії.

У третьому розділі представлено архітектуру програмного забезпечення: структура коду, ініціалізація компонентів, зчитування сенсорних даних,

збереження параметрів у EEPROM, реалізація меню користувача та логіка керування пристроями.

У четвертому розділі проведено тестування і дослідження роботи системи в експериментальному середовищі. Проаналізовано реакцію пристрою на зміни кліматичних параметрів, перевірено ефективність алгоритмів та стабільність автономної роботи.

У висновках узагальнено результати дослідження, підтверджено доцільність використання обраних технічних рішень та сформульовано рекомендації щодо подальшого вдосконалення системи.

Кваліфікаційна робота містить 70 сторінок (без додатків), 12 таблиць, 59 рисунків, 28 джерел посилання та 3 додатки.

Ключові слова: *моніторинг температури, Arduino, SIM800L, складське зберігання, автоматизація, мікроконтролер, сенсор DS18B20.*

ABSTRACT

of the Bachelor's Thesis

" GardenSens – an automated microclimate monitoring system based on Arduino"

Student: Oleksandr Petrenko

Supervisor: Candidate of Phys. and Math. Sciences, Assoc. Prof. Yaroslav Kraynyk

This thesis explores the development of a prototype device for monitoring the temperature regime in warehouse environments to ensure optimal storage conditions. The relevance of the topic stems from the demand for affordable and reliable solutions for automated microclimate control in small and medium-sized storage facilities.

Object of the research: microcontroller-based automated monitoring systems.

Subject of the research: technologies for collecting, processing, and transmitting temperature control data using Arduino-based systems.

The goal of this work is to develop an accessible and efficient device capable of real-time air temperature monitoring, data display, and critical parameter alerting via notifications.

The developed device is based on the Arduino Pro Mini board and utilizes the DS18B20 digital temperature sensor. Data is displayed on an OLED screen, and alerts are delivered using a SIM800L GSM module. The system also supports remote status queries via incoming calls.

The practical significance of the project lies in its applicability for monitoring storage conditions for food, medicines, and technical materials. The scientific novelty is the adaptation of affordable microcontroller hardware for autonomous operation with energy-saving features, a simple user interface, and customizable threshold settings.

The work was tested in conditions that simulate a warehouse environment. No publications were made based on the project results.

The explanatory note of the bachelor's qualification thesis consists of an introduction, four main chapters, conclusions, a list of references, and three appendices. The work consistently examines both theoretical and practical aspects of developing an automated microclimate monitoring system for warehouse facilities.

The introduction substantiates the relevance of the topic, defines the purpose and objectives of the study, characterizes the object and subject of research, and outlines the practical significance of the proposed solution.

The first chapter provides an overview of modern monitoring technologies, presents a comparative analysis of existing systems, identifies their advantages and disadvantages, and justifies the feasibility of choosing a custom architecture for the GardenSens system.

The second chapter gives a detailed description of the hardware components of the device: the selected microcontrollers, sensors, actuators, power supply modules, display, and control elements. Their technical specifications and interaction principles are provided.

The third chapter presents the software architecture: code structure, component initialization, sensor data acquisition, parameter storage in EEPROM, implementation of the user menu, and device control logic.

The fourth chapter includes testing and experimental evaluation of the system's operation in a controlled environment. The device's response to changes in climatic parameters is analyzed, the effectiveness of the algorithms is verified, and the stability of autonomous operation is confirmed.

The conclusions summarize the research results, confirm the appropriateness of the selected technical solutions, and provide recommendations for further system improvement.

The qualification paper contains 70 pages (excluding appendices), 12 tables, 59 figures, 28 references, and 3 appendices.

Keywords: *temperature monitoring, Arduino, SIM800L, warehouse storage, automation, microcontroller, DS18B20 sensor.*

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ.....	4
ВСТУП	5
1 АНАЛІЗ СУЧАСНИХ РІШЕНЬ У ГАЛУЗІ МОНІТОРИНГУ МІКРОКЛІМАТУ	7
1.1 Огляд сучасних технологій моніторингу	7
1.2 Порівняння доступних систем автоматизації	11
1.3 Опис схеми пристрою на базі Arduino Nano та характеристика кожного використаного елементу	14
1.4 Огляд сучасних технологій моніторингу	16
1.5 Технічні та програмні вимоги до системи GardenSens	19
2 АПАРАТНА ЧАСТИНА СИСТЕМИ GARDENSENS	23
2.1 Вибір мікроконтролера та периферії	23
2.2 Опис та характеристика сенсорів системи GardenSens.....	26
2.3 Виконавчі пристрої системи GardenSens.....	32
2.4 Дисплей та органи управління системи GardenSens	37
2.5 Енергозабезпечення системи GardenSens.....	39
3 ПРОГРАМНА ЧАСТИНА СИСТЕМИ GARDENSENS	44
3.1 Архітектура програмного забезпечення та конфігурація системи	44
3.2 Ініціалізація системи (setup)	46
3.3 Головний цикл (loop)	48
3.4 Структура збереження налаштувань та використання EEPROM	51
3.5 Підключення та використання бібліотек у GardenSens	54
4 ТЕСТУВАННЯ розробленої системи GardenSens	58
4.1 Опис інтерфейсу користувача	59
4.2 Методика тестування системи GardenSens	62
4.3 Результати тестування в тепличному середовищі.....	63
4.4 Тестування режимів роботи системи	65
ВИСНОВКИ.....	68

ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ	70
ДОДАТОК А Код програми.....	73
ДОДАТОК Б Тестування компонентів системи	76
ДОДАТОК В Інтерфейс користувача системи GardenSens	77
ДОДАТОК Г Апробація матеріалів КБР	79

ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ

ADC	–	Analog-to-Digital Converter
CO ₂	–	Carbon Dioxide
EEPROM	–	Electrically Erasable Programmable Read-Only Memory
GSM	–	Global System for Mobile Communications
I ² C	–	Inter-Integrated Circuit
ISP	–	Internet Service Provider
MCU	–	Microcontroller Unit
OLED	–	Organic Light-Emitting Diode
PID	–	Proportional-Integral-Derivative
PWM	–	Pulse Width Modulation
UART	–	Universal Asynchronous Receiver-Transmitter

ВСТУП

У сучасному світі аграрна галузь активно інтегрує новітні інформаційні та автоматизовані технології з метою підвищення ефективності виробництва, зменшення впливу людського фактору та покращення якості продукції. Одним із найбільш перспективних напрямів у цій сфері є створення систем моніторингу та керування мікрокліматом у захищеному ґрунті, зокрема в теплицях. Такі системи дозволяють забезпечити стабільні умови для росту рослин, що особливо важливо в умовах нестабільного клімату та високих вимог до врожайності.

Актуальність проекту зумовлена необхідністю зниження енергоспоживання, оптимізації витрат ресурсів і мінімізації участі людини в процесі вирощування культур. Розробка подібних рішень сприяє цифровізації сільського господарства та відповідає глобальним тенденціям розвитку індустрії 4.0. З огляду на зростаючий попит на екологічно чисту продукцію, автоматизований контроль умов вирощування стає необхідною умовою конкурентоспроможного аграрного виробництва. Система GardenSens забезпечує надійність, стабільність параметрів середовища, можливість автономної роботи та адаптацію під потреби конкретного користувача.

Метою даної роботи є розробка багатофункціональної автоматизованої системи GardenSens, яка дозволяє контролювати основні параметри мікроклімату: температуру, вологість повітря та ґрунту, рівень освітленості та концентрацію CO₂. Розробка включає як апаратну частину (датчики, виконавчі пристрої, мікроконтролер), так і програмне забезпечення, що забезпечує логіку роботи та зручний інтерфейс взаємодії з користувачем.

GardenSens призначена для використання у малих і середніх тепличних господарствах, а також може бути адаптована для інших середовищ із контрольованим мікрокліматом, таких як інкубатори, тераріуми чи акваріуми. Система орієнтована на розширюваність і простоту налаштування, що

дозволяє впроваджувати її як фермерам-початківцям, так і досвідченим агроспеціалістам.

Об'єкт дослідження: процес автоматизованого керування мікрокліматом у закритому середовищі (теплиці).

Предмет дослідження: апаратно-програмна система моніторингу та регулювання мікрокліматичних параметрів з використанням мікроконтролерів, сенсорів та алгоритмів керування.

Практичне значення: створення інтелектуальної автоматизованої системи GardenSens, яка забезпечує ефективний моніторинг і керування мікрокліматом у теплицях за допомогою сучасних сенсорів, виконавчих механізмів та програмної логіки. Завдяки своїй архітектурі, система є прикладом енергоефективного, доступного і масштабованого рішення, що дозволяє підтримувати стабільні умови для вирощування сільськогосподарських культур без постійної участі людини.

Розробка такого рішення потребувала поетапного виконання наступних завдань:

- проєктування електричної схеми та архітектури системи;
- добору оптимальних апаратних засобів (датчиків, мікроконтролерів, виконавчих пристроїв);
- написання програмного забезпечення з підтримкою різних режимів роботи (таймер, сенсор, PID-регулювання);
- реалізації збереження налаштувань у пам'яті мікроконтролера;
- забезпечити збереження налаштувань у пам'яті мікроконтролера;
- створення зручного інтерфейсу користувача;
- тестування системи у реальних умовах експлуатації.

Таким чином, GardenSens є не лише технічно завершеним проєктом, а й практичним прикладом застосування сучасних технологій автоматизації в аграрній сфері, з потенціалом для подальшого впровадження та масштабування.

1 АНАЛІЗ СУЧАСНИХ РІШЕНЬ У ГАЛУЗІ МОНІТОРИНГУ МІКРОКЛІМАТУ

1.1 Огляд сучасних технологій моніторингу

У сучасному агропромисловому комплексі моніторинг параметрів мікроклімату є одним із ключових аспектів ефективного ведення сільського господарства. Забезпечення стабільних умов росту і розвитку рослин потребує ретельного контролю температури, вологості, освітлення, рівня вуглекислого газу та інших параметрів. Зважаючи на кліматичну нестабільність, вплив зовнішніх факторів та потребу в точному регулюванні умов, традиційні методи моніторингу стають недостатньо ефективними, а автоматизовані системи набувають дедалі більшого поширення.

Системи моніторингу дозволяють в режимі реального часу здійснювати вимірювання показників, зберігати їх для подальшого аналізу, формувати звіти та автоматично реагувати на виявлені відхилення. Це знижує людський фактор, підвищує продуктивність та дозволяє заощаджувати ресурси. Впровадження таких технологій особливо актуальне в тепличних господарствах, де контроль мікроклімату є основною умовою для отримання якісної продукції.

Залежно від складності й рівня інтеграції, сучасні технології моніторингу поділяються на автономні локальні рішення та комплексні розподілені системи (IoT-платформи). Локальні системи, як правило, базуються на контролерах Arduino або STM32. Вони призначені для реалізації простих задач – вимірювання температури, виводу значень на дисплей, включення реле тощо. Вони не потребують підключення до мережі Інтернет і добре підходять для невеликих фермерських господарств, навчальних лабораторій чи демонстраційних стендів.

IoT-рішення є більш складними і гнучкими. Вони побудовані на основі мікроконтролерів ESP32, Raspberry Pi, або навіть промислових контролерів. Дані передаються на сервер, де обробляються й відображаються в інтерфейсі

користувача. Можливе налаштування повідомлень, ведення статистики, віддалене керування. Це відкриває нові можливості для оптимізації умов вирощування культур, а також дозволяє інтегрувати системи моніторингу з аграрними ERP-системами.

У відкритих апаратно-програмних платформах, таких як Arduino, використовуються датчики нового покоління: BME280 [2] (температура, вологість, тиск), DS18B20 [3] (точкове вимірювання температури), DHT22, BH1750 (освітленість), MQ-серія (газові датчики). Вивід інформації здійснюється через OLED-дисплеї [8], LCD 1602/2004, графічні панелі або мобільні додатки. Управління може бути реалізовано за допомогою енкодера, сенсорних кнопок, Bluetooth-з'єднання або веб-інтерфейсу.

Все більше систем впроваджують енергоефективні алгоритми та інтелектуальні режими роботи, наприклад:

- динамічне включення освітлення в режимі «світанку/заходу».
- адаптивне зрошення за вологістю ґрунту.
- вентиляція при перевищенні температури або рівня CO₂.
- логування показників у внутрішню або зовнішню пам'ять.

У системах, побудованих на відкритих апаратних платформах (Arduino, ESP32), використовуються датчики нового покоління: BME280 [2], DS18B20 [3], BH1750, DHT22, MQ-135 [4] тощо. Завдяки наявності відкритих бібліотек і широкої спільноти, навіть недосвідчений користувач може реалізувати проєкт моніторингу. Найчастіше такі системи включають дисплей (LCD або OLED), енкодер для взаємодії з меню, релейний блок для керування пристроями (освітленням, вентиляторами, насосами) та годинник реального часу DS3231 для таймерного режиму.

Для розробки мікроконтролеру було створено блок-схеми функціонування системи моніторингу температури в GardenSens: блок-схема на рис. 1.1 демонструє покрокову логіку функціонування системи моніторингу GardenSens у штатному режимі. Її структура побудована відповідно до

принципу циклічної обробки, що є характерним для вбудованих мікроконтролерних систем на базі Arduino.



Рисунок 1.1 – Блок-схема логіки функціонування системи GardenSens

Ця блок-схема є ключовим інструментом для розуміння алгоритму роботи системи GardenSens, особливо на етапі налагодження або аналізу надійності системи. Вона також слугує основою для реалізації розширених сценаріїв керування мікрокліматом – на основі CO₂, вологості ґрунту чи добового таймера.

Електрична схема пристрою є основою функціонального зв'язку між усіма модулями, датчиками, виконавчими елементами та мікроконтролером. Вона розроблена з урахуванням вимог надійності, простоти монтажу та можливості автономної роботи пристрою.

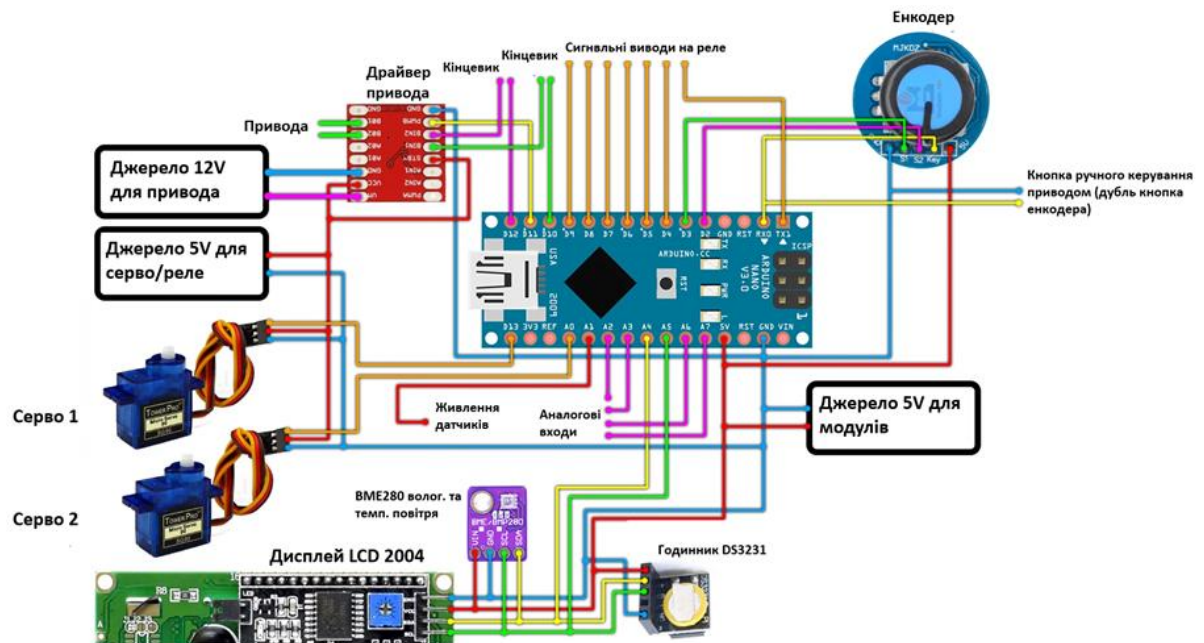


Рисунок 1.2 – Електрична схема пристрою GardenSens

Важливою особливістю є можливість оновлення налаштувань через інтерфейс меню та збереження їх у енергонезалежній пам'яті EEPROM, що гарантує збереження конфігурації навіть при відключенні живлення.

Сигнальні та силові частини схеми розділені для забезпечення електромагнітної сумісності, а також для запобігання впливу високих струмів на чутливу електроніку.

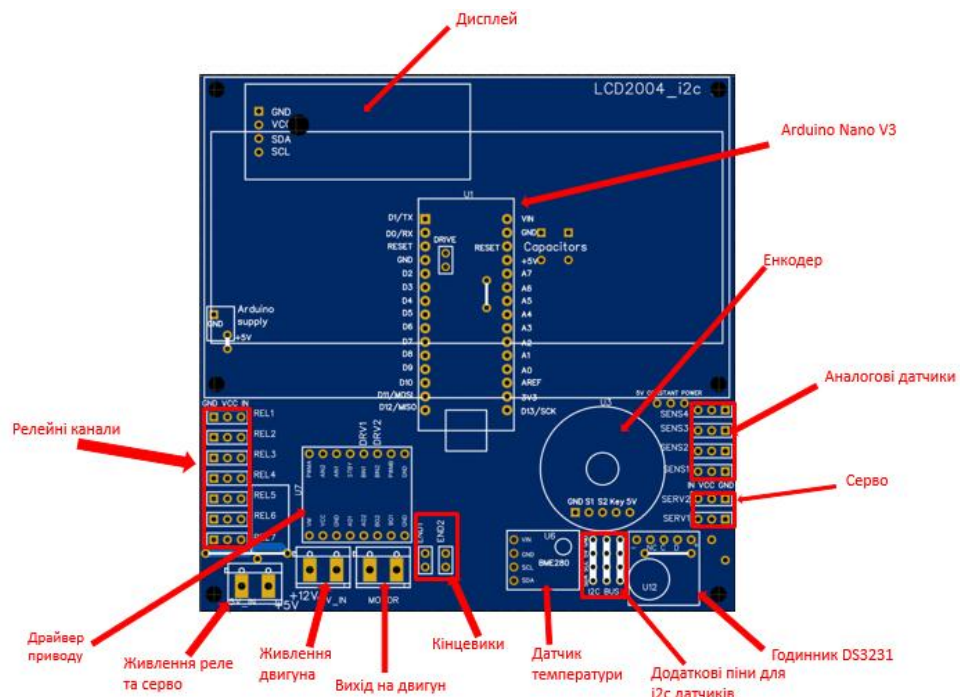


Рисунок 1.3 – Загальна схема роботи системи моніторингу мікроклімату

Сучасні технології моніторингу мікроклімату дозволяють не лише фіксувати параметри середовища, а й забезпечують адаптивну логіку управління. Саме такі підходи були використані при створенні системи GardenSens, що поєднує функціональність, простоту, енергоефективність і готовність до масштабування.

1.2 Порівняння доступних систем автоматизації

У сучасних умовах ринку спостерігається активний розвиток автоматизованих систем керування мікрокліматом у теплицях. Серед найбільш поширених промислових та побутових рішень можна виокремити як універсальні контролери, так і спеціалізовані пристрої для поливу, вентиляції або регулювання температури.



Рисунок 1.4 – Логічний модуль Siemens LOGO!8 LOGO!12/24RCE 12/24 VDC, реле, 8 DI / 4 DO [25]

Siemens LOGO!8 (модель LOGO!12/24RCE) – це програмований логічний контролер (ПЛК), який підтримує до 8 дискретних входів і 4 релейних виходи. Перевагами цього рішення є надійність, підтримка мережевого зв'язку Ethernet, гнучке програмування за допомогою LOGO!Soft Comfort та масштабованість. Такі модулі часто використовують у

промислових теплицях для побудови складних сценаріїв керування освітленням, вентиляцією, опаленням або поливом.



Рисунок 1.5 – Контролер Galcon 8000 Indoor [26]

Galcon 8000 Indoor – це автоматичний контролер для систем поливу, який орієнтований переважно на аграрний сектор і ландшафтний дизайн. Пристрій дозволяє налаштовувати режими поливу за часом і днями тижня, має можливість підключення до датчиків вологості та підтримує резервне живлення. Його перевагами є простота використання та захищеність до умов навколишнього середовища.

Такі системи мають високу надійність, однак є доволі дорогими та вимагають певних технічних навичок для налаштування. Саме тому виникає потреба у створенні доступніших рішень на базі відкритих апаратних платформ, як-от Arduino, що забезпечують широкую кастомізацію функціоналу за значно нижчою вартістю. У цьому контексті і був розроблений пристрій GardenSens як приклад практичного втілення ідей автоматизованого моніторингу за допомогою мікроконтролерної системи.

Автоматизовані системи можна умовно поділити на три категорії:

1) промислові системи – такі як Siemens LOGO!, Schneider Electric Zelio, Galcon та інші. Це рішення високого класу, які мають багаторівневий захист, сертифіковані протоколи обміну даними та інтеграцію в SCADA-

системи. Вони забезпечують точний контроль, довготривалу надійну роботу, технічну підтримку та відповідність міжнародним стандартам. Проте ціна таких рішень надто висока для індивідуального або малобюджетного використання, а налаштування вимагає спеціальної підготовки;

2) напівпрофесійні системи – ґрунтуються на мікроконтролерах ESP32, STM32 або одноплатних комп'ютерах Raspberry Pi. Вони мають вбудовані інтерфейси Wi-Fi або Bluetooth, можуть працювати із веб-серверами, передавати дані на хмарні сервіси, підтримують вивід графіків та логів. Такі рішення часто використовуються у хобі-проектах, невеликих фермерських господарствах та у навчальному процесі. Вони значно гнучкіші за промислові рішення, однак налаштування таких систем передбачає володіння мовами програмування (Python, C++) та навички мережевого конфігурування;

3) DIY-рішення на базі Arduino – найпоширеніший варіант серед студентів, ентузіастів та новаторів. Найчастіше базуються на платформі Arduino (Nano, Uno, Mega), яка має відкриту архітектуру, безліч доступних бібліотек, модулів, та детальну технічну документацію. Переваги такого підходу – низька вартість реалізації, легке освоєння, просте підключення сенсорів і актуаторів. Недоліки – відсутність вбудованої підтримки бездротової передачі даних (потреба додаткових модулів), менший об'єм пам'яті, ручна конфігурація та обмежені можливості масштабування/

Таблиця 1.1 – Порівняльна характеристика систем автоматизації мікроклімату

Категорія	Приклад	Переваги	Недоліки
Промислові	Siemens, Galcon	Надійність, сертифікація	Висока вартість, складне впровадження
Напівпрофесійні	ESP32, STM32	Гнучкість, можливість віддаленого доступу	Потрібні навички програмування

Категорія	Приклад	Переваги	Недоліки
DIY-платформи	Arduino	Простота, доступність, активна спільнота	Обмежені ресурси, ручне налаштування

Ураховуючи поставлену мету проекту GardenSens – створити доступну, гнучку та енергоефективну систему моніторингу мікроклімату для малих теплиць – було вирішено використати DIY-підхід на базі мікроконтролера Arduino Nano [1]. Такий варіант дозволяє максимально ефективно реалізувати заявлену функціональність при мінімальних витратах, забезпечуючи при цьому зручність обслуговування та можливість подальшої модернізації.

1.3 Опис схеми пристрою на базі Arduino Nano та характеристика кожного використаного елементу

Обраний підхід до побудови архітектури GardenSens базується на принципі модульності та гнучкого конфігурування. Центральним елементом системи є Arduino Nano V3 [1], який має компактні розміри, низьке енергоспоживання та достатній набір вхідних/вихідних портів. Контролер забезпечує взаємодію з сенсорами, дисплеєм, реле, сервоприводами та іншими модулями.

Для вимірювання параметрів мікроклімату використовуються датчики BME280 [2] (температура, вологість, тиск), DS18B20[3] (грунтова температура), BH1750 (освітленість) та MQ-135 [4] (рівень CO₂). Дані зчитуються по інтерфейсу I²C або 1-Wire і обробляються у мікроконтролері.

Результати виводяться на OLED-дисплей [8]. За допомогою енкодера з кнопкою реалізовано локальний інтерфейс керування: перегляд поточних параметрів, зміна режимів, налаштування порогових значень. Також реалізовано збереження налаштувань у EEPROM, що дозволяє зберігати конфігурацію після перезавантаження.

Керування виконавчими механізмами здійснюється через релейні модулі (освітлення, обігрів, вентиляція), сервоприводи (механічні заслінки), а також драйвери двигунів для лінійного приводу. Для автономного живлення застосовується акумулятор 18650 [27] з платою заряду TP4056 [5] та підвищувальним модулем MT3608 [10].

Програмна частина підтримує кілька режимів роботи: таймерний (вмикання/вимикання за часом), сенсорний (реакція на зміну параметрів), ПІД-регулювання (точне підтримання температури), а також режим «світанку» (плавне включення світла). Архітектура дозволяє масштабування: можна підключити нові датчики, бездротові модулі або змінити логіку без переробки всієї системи. Програмна частина підтримує кілька режимів роботи: таймерний (вмикання/вимикання за часом), сенсорний (реакція на зміну параметрів), ПІД-регулювання (точне підтримання температури), а також режим «світанку» (плавне включення світла). Архітектура дозволяє масштабування: можна підключити нові датчики, бездротові модулі або змінити логіку без переробки всієї системи.

Усі основні апаратні компоненти та їх функціональне призначення наведені в табл. 1.2, що дозволяє наочно оцінити доцільність обраного складу пристрою та його взаємозв'язок із поставленими вимогами.

Таблиця 1.2 – Основні компоненти апаратної архітектури GardenSens

Компонент	Функція	Причина вибору
Arduino Nano V3	Центральний мікроконтролер системи	Компактність, низьке енергоспоживання, підтримка I ² C/SPI
BME280	Вимірювання температури, вологості та атмосферного тиску	Точність, стабільність, цифровий вихід
DS18B20	Контроль температури ґрунту	Простота з'єднання по 1-Wire, точність

Компонент	Функція	Причина вибору
MQ-135	Вимірювання рівня вуглекислого газу	Чутливість до CO ₂ та інших газів
OLED-дисплей	Виведення інформації та меню	Енергоефективність, зручність читання
Енкодер з кнопкою	Локальний інтерфейс користувача	Простота управління, економія GPIO
Релейний модуль	Керування освітленням, вентиляцією, підігрівом	Готовий модуль на 5V, просте підключення
Серводвигуни	Керування механічними заслінками	Точність положення, легке керування через PWM
TP4056	Автономне живлення системи	Захист заряду, стабілізація напруги

GardenSens є прикладом адаптивної, доступної та функціональної системи автоматизованого моніторингу мікроклімату, яка може бути легко модифікована під конкретні завдання користувача. Її структура дає змогу використовувати пристрій у навчальному процесі, дослідницькій роботі або в якості елемента «розумної теплиці».

1.4 Огляд сучасних технологій моніторингу

Сучасні технології моніторингу мікроклімату базуються на застосуванні високоточних сенсорів, енергоефективних мікроконтролерів та інтелектуальних алгоритмів обробки даних. Основна мета таких систем – забезпечити стабільні умови вирощування культур завдяки постійному збору інформації про середовище та автоматичному реагуванню на його зміну.

Найбільш поширеними параметрами для моніторингу є:

- температура повітря і ґрунту;
- вологість повітря і ґрунту;

- рівень CO₂;
- освітленість;
- атмосферний тиск.

У тепличних системах управління часто використовують сенсори DS18B20 [3], DHT22, BME280 [2], BH1750, MQ-135 [4], MH-Z19 [13], які забезпечують точні вимірювання та легко інтегруються з Arduino.

Залежно від обраного сенсора точність та діапазон вимірювання можуть суттєво відрізнятись. Наприклад, для контролю температури повітря (рис. 1.6) найточнішими є DS18B20 [3] та DHT22 з похибкою до $\pm 0.5^\circ\text{C}$, тоді як BME280 [2] демонструє трохи нижчу точність ($\pm 1.0^\circ\text{C}$).

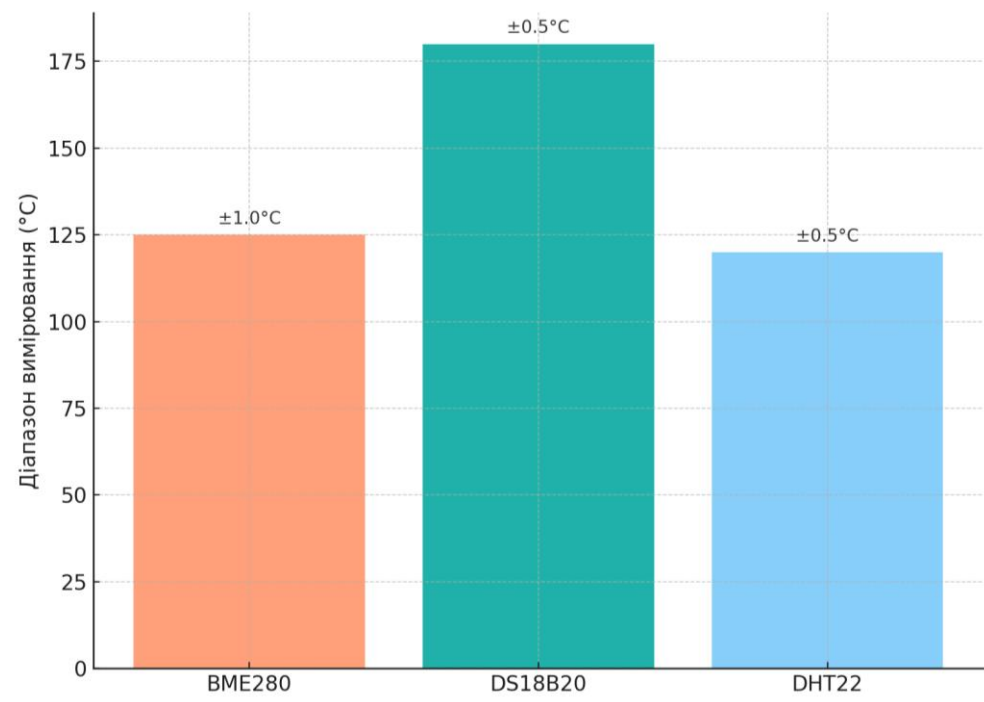


Рисунок 1.6 – Порівняння сенсорів температури повітря

Для моніторингу температури ґрунту (рис. 1.7) найкращим вибором є DS18B20 [3] з точністю $\pm 0.5^\circ\text{C}$ та широким діапазоном вимірювання. Альтернативами є термістор NTC [15] та DHT11, які мають більшу похибку.

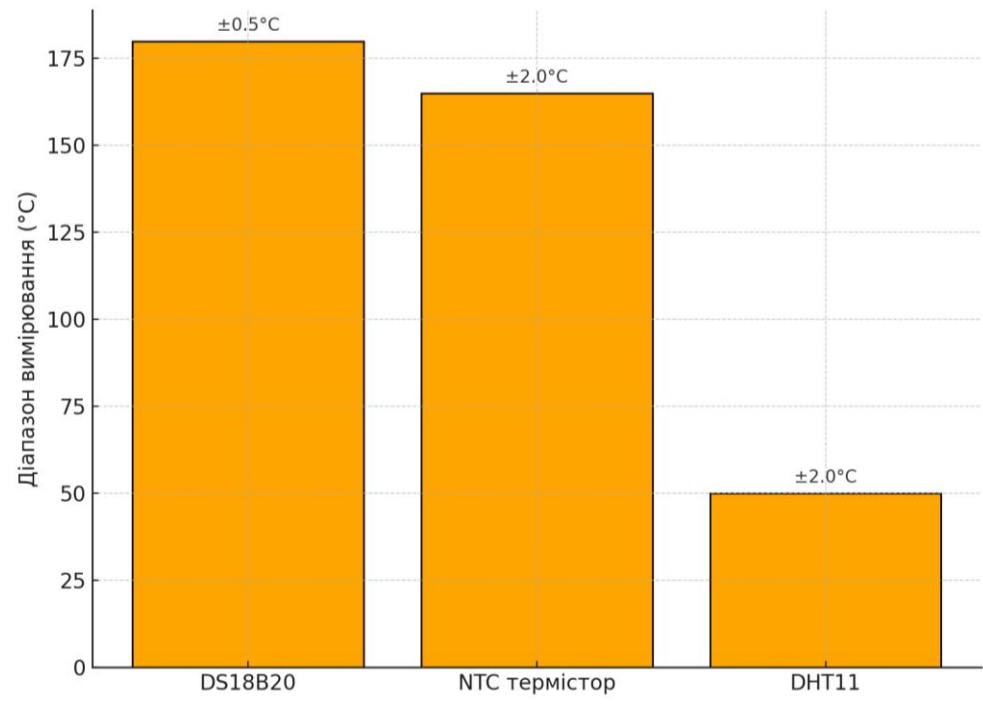


Рисунок 1.7 – Порівняння сенсорів температури ґрунту

Вологість ґрунту (рис. 1.8) можна вимірювати кількома типами сенсорів: аналоговими (YL-69), ємнісними (Capacitive v1.2) або цифровими (DFRobot SEN0193). Останній забезпечує найвищу точність (до 3 % похибки).

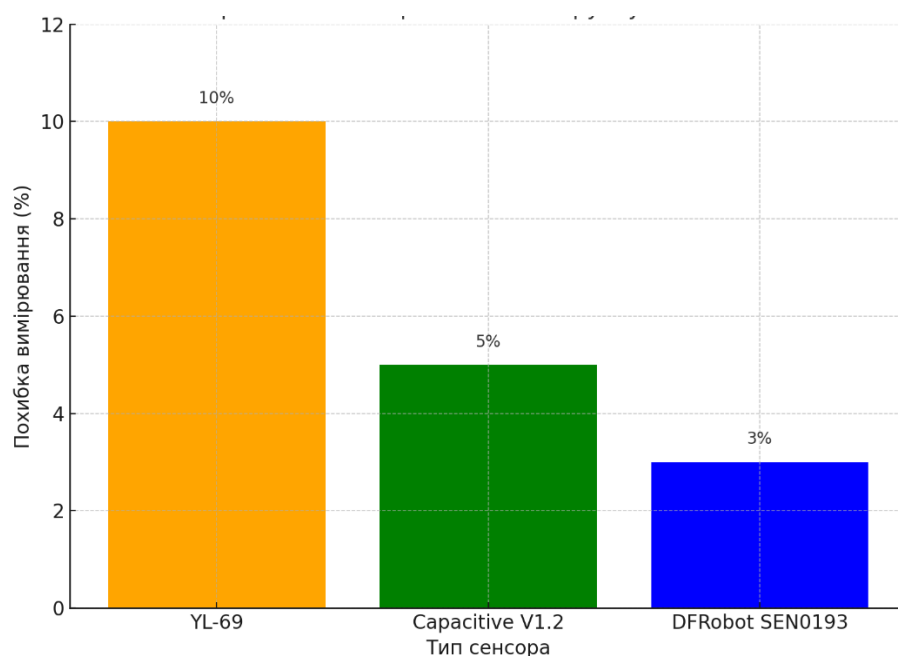


Рисунок 1.8 – Порівняння сенсорів вологості ґрунту

Одним із найважливіших параметрів є рівень CO₂. На рис. 1.9 показано порівняння популярних газових сенсорів. MQ-135 [4] має високу похибку (до 30 %), тому для точного моніторингу краще використовувати MH-Z19 [13] або Senseair S8.

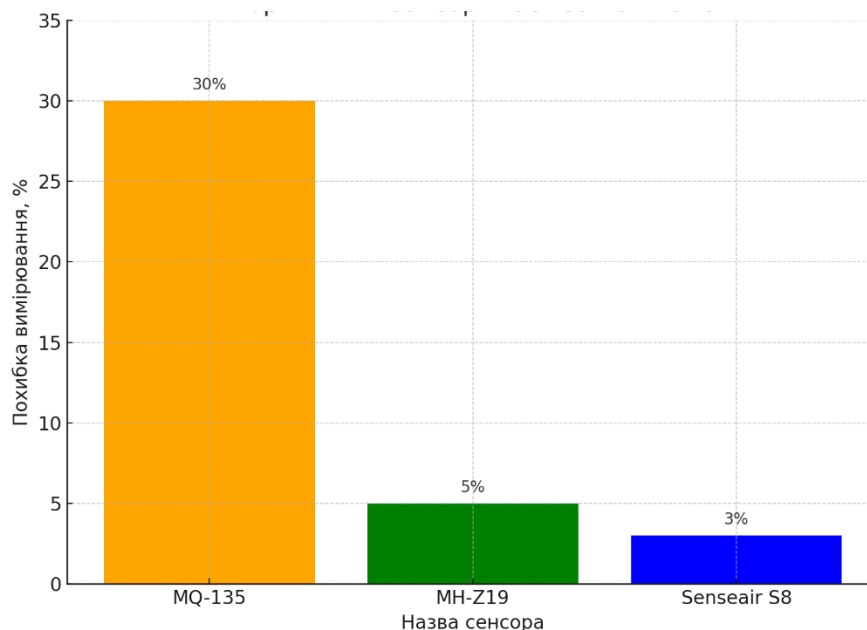


Рисунок 1.9 – Порівняння сенсорів CO₂

Сучасні автоматизовані системи, такі як GardenSens, дозволяють поєднувати ці сенсори в одну мережу, зчитувати дані в реальному часі, виводити на дисплей, передавати на віддалені сервери або мобільні додатки. Завдяки відкритій архітектурі Arduino Nano [1], ESP32 або STM32, розширити або вдосконалити таку систему можна без значних витрат.

Таким чином, правильний підбір технологій моніторингу дозволяє створити ефективну та адаптивну систему, яка відповідає вимогам точності, автономності та зручності у використанні як у невеликих теплицях, так і в лабораторних умовах.

1.5 Технічні та програмні вимоги до системи GardenSens

Розробка автоматизованої системи моніторингу GardenSens потребує чіткого визначення технічних та програмних вимог, які забезпечать її

ефективну роботу в умовах тепличного середовища. Технічні вимоги включають підбір апаратних компонентів з урахуванням умов експлуатації, типів сенсорів, інтерфейсів обміну даними та способів живлення. Програмні вимоги, у свою чергу, охоплюють логіку роботи пристрою, підтримку режимів автоматичного керування та зручність взаємодії з користувачем.

Основні технічні вимоги:

- підтримка цифрових сенсорів температури (DS18B20, BME280), вологості (Capacitive Soil Sensor), освітленості (BH1750) та CO₂ (MQ-135, MH-Z19);
- використання Arduino Nano [1] як основного контролера з мінімальним енергоспоживанням;
- наявність інтерфейсів I²C, 1-Wire, аналогового вводу;
- робота від джерел живлення 3.7–5 В, з підтримкою акумуляторного живлення (18650) та зарядного модуля TP4056 [5];
- підтримка виводу інформації на OLED-дисплей 128 × 64;
- інтеграція релейного модуля для керування освітленням, вентиляцією, насосами;
- можливість підключення модулів зв'язку: GSM (SIM800L) [8] або Wi-Fi (ESP8266) [7];
- компактне компонування плати для розміщення у вологих середовищах із захистом від коротких замикань.

Програмне забезпечення системи повинно забезпечити стабільну роботу пристрою, враховуючи обмеженість апаратних ресурсів мікроконтролера, та мати можливість реагування на критичні зміни умов.

Основні програмні вимоги:

- підтримка роботи у кількох режимах: сенсорному, таймерному, режимі ПІД-регулювання;
- зберігання налаштувань користувача в EEPROM для уникнення втрат після перезапуску;

- реалізація інтерфейсу користувача через енкодер і меню OLED-дисплея;
- наявність механізмів аварійного реагування при критичних відхиленнях параметрів;
- оптимізація коду для стабільної роботи з великою кількістю сенсорів;
- логування даних у пам'ять або передача через бездротовий інтерфейс;
- можливість оновлення прошивки через серійний порт або бездротово (для ESP).

Таблиця 1.3 – Узагальнені вимоги до GardenSens

Категорія	Параметр/Опція	Значення/Тип
Контролер	Мікроконтролер	Arduino Nano V3
Живлення	Напруга живлення	3.7 – 5 V
Сенсори	Температура / Вологість / CO ₂ / Освітленість	DS18B20, BME280, MQ-135, BH1750
Інтерфейси	Типи передавання даних	I ² C, 1-Wire, Analog
Вивід даних	Дисплей	OLED 128 × 64
Зв'язок	Комунікаційні модулі	GSM (SIM800L), Wi-Fi (ESP8266)
Керування	Інтерфейс користувача	Енкодер + OLED меню
Програмне ядро	Підтримка режимів	Сенсорний, Таймер, PID, Світанок
Пам'ять	Збереження параметрів	EEPROM
Захист	Апаратний / Програмний	Захист від перенавантаження, reset-контроль

Формулювання таких вимог дозволяє забезпечити відповідність системи GardenSens реальним умовам експлуатації та очікуванням користувачів, а також полегшує її масштабування та модернізацію.

Висновки до розділу 1

У результаті аналізу сучасних рішень у сфері моніторингу мікроклімату було встановлено, що ефективне управління кліматичними умовами в тепличному середовищі потребує комплексного підходу до вибору апаратного та програмного забезпечення. Розглянуті типи систем – промислові, напівпрофесійні та DIY – мають свої переваги й обмеження, однак найбільш доцільним варіантом для малих господарств є система на базі відкритих платформ, зокрема Arduino Nano [1]. Такий підхід забезпечує гнучкість у налаштуванні, доступність компонентів та адаптацію під конкретні задачі користувача.

Було детально проаналізовано основні параметри, які можуть моніторити АПЗ, включаючи температуру, вологість, освітленість, рівень CO₂, тиск, рН, електропровідність тощо. Проведено графічне порівняння найбільш популярних сенсорів для вимірювання кожного з цих параметрів, що дозволяє зробити обґрунтований вибір на етапі проектування системи.

Також сформульовано технічні та програмні вимоги до системи GardenSens, що охоплюють ключові аспекти – від підтримки конкретних сенсорів і інтерфейсів, до реалізації користувацького інтерфейсу, енергоживлення та логіки програмної роботи. Визначено основні елементи архітектури, які забезпечують надійність, автономність та можливість масштабування.

Таким чином, розробка системи GardenSens ґрунтується на сучасних підходах до побудови автоматизованих рішень, які поєднують точність, доступність, енергоефективність і відкритість до вдосконалення. Отримані результати створюють міцне підґрунтя для реалізації повноцінної системи моніторингу мікроклімату з можливістю подальшого розширення функціональності.

2 АПАРАТНА ЧАСТИНА СИСТЕМИ GARDENSENS

Розробка апаратної частини автоматизованої системи GardenSens є ключовим етапом, що визначає ефективність, гнучкість і надійність усього комплексу. Система покликана не лише вимірювати параметри навколишнього середовища, а й забезпечувати реагування у реальному часі на виявлені зміни. Апаратна частина будується на модульному принципі, що дозволяє легко адаптувати систему під конкретні потреби користувача, розширювати функціональність або модернізувати її у майбутньому. Вона складається з мікроконтролера Arduino Nano [1], датчиків (BME280, DS18B20, МН-Z19), виконавчих механізмів (реле, сервоприводи, привід), дисплея LCD2004 [18], енкодера, модулів живлення, годинника реального часу, а також допоміжних периферійних елементів.

2.1 Вибір мікроконтролера та периферії

Центральним керувальним елементом GardenSens є Arduino Nano [1], побудований на основі мікросхеми ATmega328P. Arduino Nano [1] забезпечує стабільну роботу із цифровими, аналоговими та імпульсними сигналами. Завдяки вбудованому USB-інтерфейсу, мікроконтролер зручно прошивати, налагоджувати й оновлювати без потреби в окремому програматорі. Його компактні розміри, енергоефективність та підтримка відкритих бібліотек зробили цей вибір оптимальним для проєкту GardenSens.

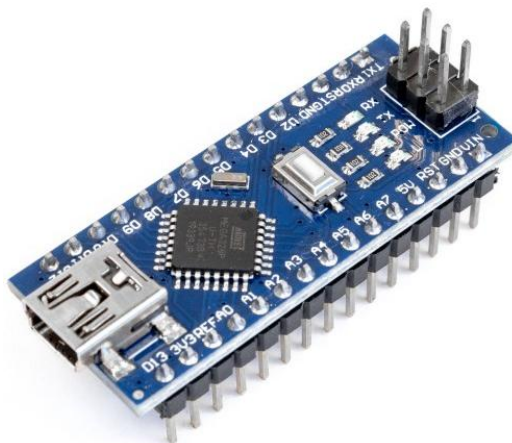


Рисунок 2.1 – Arduino Nano (ATmega 328p) [1]

Arduino Nano [1] оснащений 14 цифровими портами введення/виведення, 8 аналоговими входами, а також підтримує три основні інтерфейси передачі даних – UART, SPI та I²C. Це дозволяє одночасно взаємодіяти з кількома сенсорами та модулями (RTC, дисплей, CO₂-датчик, EEPROM тощо), забезпечуючи багатоканальну обробку даних і гнучке налаштування системи, як це наведено у табл. 2.1.

Таблиця 2.1 – Технічні характеристики Arduino Nano (ATmega 328p)

Параметр	Значення
Мікроконтролер	ATmega328P
Частота	16 МГц
Напруга живлення	5 В
Цифрові входи/виходи	14 (6 з PWM)
Аналогові входи	8
EEPROM	1 кбайт
Flash-пам'ять	32 кбайт
Програмне ядро	Підтримка режимів
UART / I ² C / SPI	Так
Розміри	45 × 18 мм

Крім обчислювального модуля, система передбачає набір периферійних пристроїв, які дозволяють зчитувати показники навколишнього середовища та реалізовувати відповідні дії. Наприклад, завдяки використанню 7 логічних виходів на 5В, система може керувати реле, що вмикають помпу, обігрівач або вентилятор. Також реалізовано підтримку двох серводвигунів, які можна використовувати для регулювання повітряних заслінок або механізмів обертання. Окремий канал відведено під двонапрямне керування лінійним електроприводом із кінцевими вимикачами – це дозволяє створювати системи автоматичного відкривання тепличних вікон або люків. Усі ці типи керування відображено в табл. 2.2.

Таблиця 2.2 – Канали керування в GardenSens

Тип каналу	Кількість, шт	Призначення
Логічний вихід 5В	7	Керування реле, транзисторами
Серводвигуни	2	Вентиляція, заслінки, приводи
Двонапрямне управління	1	Лінійний електропривід
PID-регулювання	7	Точне регулювання мікроклімату
Режим «Світанок»	4	Імітація поступового освітлення

Arduino Nano дозволяє інтегруватися з широким набором сенсорів:

- DS18B20: цифровий сенсор температури з інтерфейсом 1-Wire, що забезпечує точне вимірювання температури з високою роздільною здатністю;
- BME280: мультисенсор, який дозволяє вимірювати температуру, вологість і атмосферний тиск по шині I²C. Використовується для отримання повної картини мікроклімату;
- MH-Z19: інфрачервоний сенсор CO₂, що працює через інтерфейс UART. Дозволяє оцінювати рівень вуглекислого газу в теплиці, що особливо важливо для процесу фотосинтезу рослин;
- NTC термістори та аналогові сенсори вологості: забезпечують вимірювання температури та вологості ґрунту через аналогові входи. Такі сенсори дають змогу здійснювати безперервний контроль вологості в кореневій зоні рослин.

Ці компоненти дозволяють GardenSens забезпечувати точний контроль мікроклімату: вимірювати ключові параметри середовища, обробляти дані та приймати рішення в режимі реального часу. Вбудована пам'ять EEPROM дозволяє зберігати користувацькі налаштування, PID-константи й сценарії на випадок вимкнення живлення, що підвищує автономність роботи.

Додатково, мікроконтролер підтримує Watchdog-таймер – механізм автоматичного перезавантаження у випадку зависання, що гарантує безперервну роботу системи. Для реалізації сценаріїв поливу, освітлення та

провітрювання за графіком використовується DS3231 – модуль реального часу, який функціонує незалежно від основного живлення.

Система живиться від літій-іонного акумулятора типу 18650. Його зарядка відбувається за допомогою модуля TP4056 [5], а стабільну напругу в 5 В для живлення контролера та периферії забезпечує MT3608 [10]. Такий підхід дозволяє забезпечити роботу GardenSens навіть у віддалених локаціях без доступу до мережі.

Таблиця 2.3 – Модулі живлення GardenSens

Компонент	Призначення
TP4056	Зарядка акумулятора, захист
MT3608	Стабілізація напруги до 5 В
Акумулятор 18650	Основне джерело живлення

Для виведення інформації використовується LCD-дисплей 2004, що підключається через I²C-інтерфейс. Він дозволяє зручно переглядати поточні параметри середовища, режими роботи та повідомлення про стан системи.

Керування налаштуваннями системи здійснюється за допомогою енкодера – поворотного перемикача з кнопкою, який забезпечує навігацію по меню, зміну параметрів і запуск функцій вручну .

Усі ці елементи працюють як єдиний узгоджений комплекс, що дозволяє GardenSens автономно керувати мікрокліматом у теплицях, інкубаторах або інших контрольованих середовищах. Такий підхід дозволяє створити енергоефективну, масштабовану та зручну в налаштуванні систему, що працює 24/7 навіть у найскладніших умовах.

2.2 Опис та характеристика сенсорів системи GardenSens

Сенсорний модуль є критичним компонентом системи GardenSens, адже саме він забезпечує отримання достовірної інформації про параметри навколишнього середовища, що в подальшому використовується для автоматичного керування мікрокліматом теплиці. Сенсори, які

застосовуються в системі, були обрані з урахуванням точності, надійності, доступності, простоти монтажу, енергоспоживання та сумісності з Arduino Nano [1]. Усі компоненти пройшли тестування в лабораторних умовах та показали стабільну роботу під впливом зовнішніх чинників (температурні перепади, волога, пил). Нижче наведено загальну таблицю з основними характеристиками сенсорів.

Таблиця 2.4 – Основні сенсори GardenSens

Сенсор	Параметри	Інтерфейс	Діапазон	Призначення
DS18B20	Температура	1-Wire	–55...+125 °C	Контроль температури повітря/грунту
BME280	Темп., вологість, тиск	I ² C	–40...+85 °C; 0–100 % RH	Аналіз атмосферних умов
YL-69 + модуль	Вологість ґрунту	Аналог	0–100 %	Контроль зволоження
MH-Z19	Концентрація CO ₂	UART	0–5000 ppm	Оцінка газового середовища
NTC	Температура	Аналог	–55...+125 °C	Проста локальна термометрія

Усі сенсори, включені в систему GardenSens, є перевіреними в польових умовах та рекомендованими для застосування в автоматизованих аграрних установках. Завдяки їх використанню забезпечується точний моніторинг стану теплиці, можливість створення гнучких алгоритмів керування кліматом та зменшення втручання людини в процеси підтримання оптимальних умов для росту рослин.

2.2.1 Цифровий температурний сенсор DS18B20

Сенсор DS18B20 є одним із найбільш точних та зручних у використанні цифрових температурних сенсорів.



Рисунок 2.2 – Цифровий сенсор температури DS18B20 [3]

Його основна перевага полягає у підтримці 1-Wire інтерфейсу, що дозволяє з'єднати кілька сенсорів по одній шині даних. Завдяки водозахищеному металевому корпусу пристрій може встановлюватися як у повітрі, так і безпосередньо в ґрунт.

- діапазон: $-55...+125\text{ }^{\circ}\text{C}$;
- точність: $\pm 0.5\text{ }^{\circ}\text{C}$ у межах $-10...+85\text{ }^{\circ}\text{C}$;
- переваги: простота монтажу, унікальна адресація, зниження електромагнітних завад.

У проєкті GardenSens сенсор DS18B20 [3] використовується для моніторингу температури повітря та/або ґрунту, а також як джерело даних для ПД-регулятора або сценаріїв активації вентиляції й обігріву.

2.2.2 Стандарт захисту: IP67 або IP68

BME280 – комбінований сенсор мікроклімату. Сенсор BME280 забезпечує одночасне вимірювання температури, вологості та атмосферного тиску.

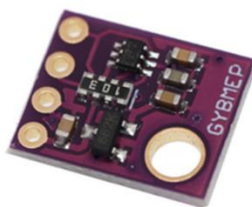


Рисунок 2.3 – Сенсор температури, вологості та тиску BME280 [2]

Сенсор BME280 [2] забезпечує одночасне вимірювання температури, вологості та атмосферного тиску. Він ідеально підходить для створення повної картини мікроклімату в теплиці. Завдяки цифровій компенсації похибок та широкому температурному діапазону сенсор має стабільну точність при тривалому використанні.

- температурний діапазон: $-40...+85\text{ }^{\circ}\text{C}$;
- діапазон вологості: $0-100\text{ \% RH}$;
- діапазон тиску: $300-1100\text{ ГПа}$;
- інтерфейси: I²C або SPI;
- особливості: компактні розміри, низьке енергоспоживання ($<1\text{ mA}$), інтеграція в мобільні та стаціонарні системи.

У системі GardenSens сенсор BME280 [2] використовується як ключовий елемент для моніторингу мікроклімату. Його дані можуть застосовуватись у режимах автоматичного поливу, провітрювання або активації PID-регуляції температури й вологості, що значно підвищує ефективність керування кліматичними параметрами.

2.2.3 YL-69 – аналоговий сенсор вологості ґрунту

YL-69 – це простий та ефективний аналоговий сенсор, що вимірює вологість ґрунту за допомогою двох металевих пластин, між якими проходить слабкий струм.

При зростанні вологості електропровідність зростає, і напруга сигналу на виході підвищується. Сенсор використовується у зв'язці з модулем-підсилювачем, який перетворює струм на аналоговий сигнал для мікроконтролера.

- принцип роботи: зміна провідності між електродами;
- сигнал: аналоговий (0–5 В);
- переваги: швидкий відгук, дешевизна, простота монтажу;
- переваги: простота, швидкий відгук, доступна ціна.

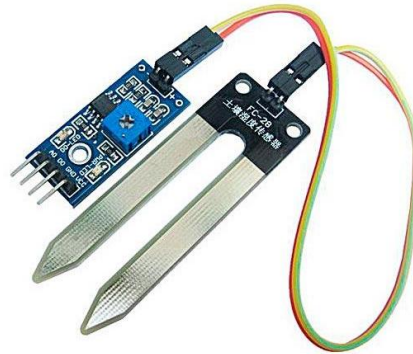


Рисунок 2.4 – Сенсор вологості ґрунту YL-69 [14]

У системі GardenSens сенсор YL-69 [14] застосовується для контролю поливу, що дозволяє значно зменшити витрати води та забезпечити оптимальні умови для росту рослин.

2.2.4 МН-Z19 – сенсор CO₂ на основі NDIR-технології

МН-Z19 – це високоточний інфрачервоний сенсор, що вимірює концентрацію CO₂ у повітрі за допомогою NDIR (Non-Dispersive InfraRed) технології.



Рисунок 2.5 – Сенсор концентрації вуглекислого газу МН-Z19 [13]

Завдяки вбудованій температурній компенсації та автоматичній калібровці, він підходить для тривалого автономного моніторингу у закритих середовищах, таких як теплиці або інкубатори:

- інтерфейс: UART або PWM;
- діапазон: 0-5000 ppm;
- точність: $\pm(50 \text{ ppm} + 5 \%)$;
- особливості: автоматичне калібрування (ABC Logic), температурна компенсація, стабільність довготривалих вимірювань.

Завдяки таким характеристикам цей датчик є важливим елементом у створенні «розумних» екологічних систем, що сприяють покращенню умов вирощування рослин і підтримці оптимального мікроклімату.

2.2.5 NTC – аналоговий термістор для температури

NTC (Negative Temperature Coefficient) – це резистивний сенсор, опір якого зменшується із зростанням температури.



Рисунок 2.6 – Аналоговий сенсор вологості ґрунту та термістор NTC [15]

Сенсор підключається через резистивний подільник напруги і формує аналоговий сигнал, який обробляється мікроконтролером. Часто використовується як резервний температурний канал або для точкового контролю в ґрунті, у воді або в зоні підігріву:

- опір при 25 °C: 10 кОм (типово);
- діапазон: $-55 \dots +125$ °C;
- переваги: висока чутливість, мала інерційність, низька вартість, простота використання;
- недоліки: нелінійна характеристика, потреба в математичній обробці (формула Стейнхарта-Харта).

У системі GardenSens NTC-термістори [15] можуть використовуватись як додаткові сенсори для локального температурного контролю в окремих зонах теплиці або резервне джерело даних при відмові основних цифрових модулів.

2.3 Виконавчі пристрої системи GardenSens

Виконавчі пристрої – це складова частина системи GardenSens, яка відповідає за реалізацію фізичних дій у відповідь на сигнали від сенсорів та програмну логіку, закладену у прошивці мікроконтролера. Їх головне завдання – автоматичне регулювання кліматичних умов у теплиці: контроль температури, вологості, подача води, керування вентиляцією та освітленням. Наявність правильно підібраних виконавчих механізмів дозволяє не лише оптимізувати витрати ресурсів, але й створити саморегульовану екосистему для вирощування рослин

Таблиця 2.3 – Основні виконавчі елементи системи GardenSens

Пристрій	Модель	Тип сигналу керування	Напруга/струм	Призначення
Реле (модуль)	5/12/24 В, 1/2/4/6/8 каналів	Цифровий	5 В, до 10 А	Вмикання насосів, ламп, вентиляторів
Твердотільне реле	Fotek SSR-25DA	Цифровий	до 240 В AC	Керування змінним навантаженням
Серводвигун	TowerPro SG90 / MG996R	PWM	5 В, 500 мА / 1.5 А	Керування вентиляційними заслінками
Водяний насос	Black 100mm, 12 В	Цифровий / реле	12 В, до 3–5 А	Автоматичний полив
Підігрівач (резистивний)	TB6612FNG	Реле або MOSFET	2.7–13.5 В, до 1.2 А на канал	Підтримання температури в холодну пору

Сукупність виконавчих пристроїв забезпечує GardenSens широкі можливості з автоматизації – від керування температурними режимами та поливом до регулювання вентиляції. Перевага у використанні конкретних

моделей полягає в їхній популярності, відкритій документації та підтримці в спільноті Arduino, що значно спрощує налаштування, обслуговування та модернізацію системи.

2.3.1 Релейні модулі 5–24 В, 1/2/4/6/8 каналів

Релейні модулі з напругою живлення 5/12/24 В застосовуються для комутації навантаження змінного або постійного струму.



Рисунок 2.7 – Модуль реле на 8 канали з оптоізоляцією, що використовується для керування навантаженням у системі GardenSens [28]

У GardenSens використовуються модулі на 1, 4 та 8 каналів із оптоізоляцією. Вони забезпечують гальванічну розв'язку між мікроконтролером та керованим навантаженням. Сигналом активації є рівень LOW або HIGH залежно від логіки модуля:

- струм навантаження: до 10 А;
- комутація: NO/NC контакти;
- візуалізація стану: LED-індикатори.

Завдяки таким характеристикам, релейні модулі є універсальним рішенням для інтеграції у проекти моніторингу та керування мікрокліматом, забезпечуючи стабільну роботу системи в реальних умовах експлуатації.

2.3.2 Твердотільне реле Fotek SSR-25DA

Твердотільне реле Fotek SSR-25DA – це електронний комутаційний пристрій, призначений для безконтактного керування змінним навантаженням.



Рисунок 2.8 – Твердотільне реле Fotek SSR-25DA [21] для комутації змінного струму в автоматизованих системах.

Цей пристрій дає змогу безшумно вмикати або вимикати змінне навантаження до 240 В. Відсутність механічних контактів забезпечує високу надійність і довготривалий термін служби. Реле керується сигналом низької напруги 3–32 В DC, що робить його сумісним з Arduino:

- переваги: відсутність шуму, іскри, висока швидкодія;
- недоліки: потреба в охолодженні при великих навантаженнях.

Твердотільне реле Fotek SSR-25DA забезпечує надійне і безшумне керування змінним струмом до 240 В без механічного зносу. Його сумісність із низьковольтними сигналами робить пристрій ідеальним для автоматизованих систем на базі Arduino, хоча при великих навантаженнях потрібне охолодження.

2.3.3 Серводвигуни TowerPro SG90 / MG996R

Серводвигуни SG90 [22] (малопотужний) і MG996R [23] (потужний) дозволяють реалізувати регулювання положення механічних елементів.

SG90 [22] підходить для легких конструкцій (жалюзі, шторки), MG996R [23] – для вентиляційних клапанів або заслінок із більшим зусиллям.

Кут обертання: до 180° (SG90), до 360° (MG996R, без зворотного зв'язку)

Управління: PWM сигнал тривалістю 1–2 мс на частоті 50 Гц



Рисунок 2.9 – Комплектуючі, застосовувані для точного керування положенням заслінок і механізмів: а) серводвигун TowerPro SG90 [22]; б) серводвигун MG996R [23]

Завдяки простоті підключення та широкій підтримці в середовищі Arduino, серводвигуни стали зручним засобом для точного позиціонування механічних частин. У системі GardenSens вони використовуються для реалізації механізмів автоматичного провітрювання, відкривання заслінок або управління світловими екранами, забезпечуючи адаптацію до змін температури та вологості в теплиці.

2.3.4 Лінійний актуатор Black 100 mm, 12 В

Лінійний актуатор Black 100 mm, 12 В – це електромеханічний виконавчий пристрій, призначений для створення поступального (лінійного) руху з фіксованим ходом 100 мм.



Рисунок 2.10 – Лінійний електричний актуатор Black 100 mm, 12 В, [24]
для автоматичного відкривання вентиляційних вікон

Цей актуатор дозволяє виконувати поступальний рух із ходом 100 мм. Працює на напрузі 12 В та може керуватись реле або драйвером типу TB6612FNG [20]. Використовується для відкриття вентиляційних вікон, підняття кришок, шторок тощо:

- напруга живлення: 12 В;
- хід штока: 100 мм;
- сила тяги: до 100 кг (залежно від моделі);
- швидкість переміщення: ~10 мм/с;
- переваги: простота інтеграції, висока сила.

Завдяки простому керуванню та надійності, лінійний актуатор ідеально підходить для автоматизованих систем, де потрібен потужний і контрольований лінійний рух. У GardenSens він використовується як частина вентиляційного модуля або системи відкриття вікон.

2.3.5 Драйвер двигуна TB6612FNG

Модуль TB6612FNG [20] використовується для двоканального керування двигунами постійного струму або лінійними актуаторами.



Рисунок 2.11 – Модуль драйвера двигунів TB6612FNG [20]

для двоканального керування актуаторами або двигунами постійного струму

Він приймає сигнали PWM та логічні команди, забезпечуючи зміну напрямку обертання або руху. Має вбудовану термозахист та захист від короткого замикання:

- струм: до 1.2 А на канал, пікова витримка до 3 А;

- напруга живлення моторів: до 13.5 В;
- застосування: компактні пристрої, керування актуаторами без реле.

Такий драйвер дає змогу реалізувати точне і надійне керування моторами в сучасних автоматизованих системах, з мінімальними габаритами і високою енергоефективністю.

2.4 Дисплей та органи управління системи GardenSens

Для взаємодії користувача із системою GardenSens передбачено використання LCD-дисплея моделі LCD2004 [18] із модулем I²C та енкодера типу KY-040 [9] або EC11. Таке поєднання забезпечує зручний доступ до параметрів мікроклімату, дозволяє налаштовувати робочі режими, перевіряти статус системи, запускати ручні операції, змінювати порогові значення тощо.

Інтерфейс розроблено таким чином, щоб він був інтуїтивно зрозумілим навіть для користувачів без технічної підготовки. Основний екран відображає поточні значення температури, вологості, рівня CO₂, стану реле, а також активний режим роботи. Перехід між меню здійснюється обертанням енкодера, а вибір підтверджується натисканням на нього.

Інтеграція LCD-дисплея та енкодера в GardenSens забезпечує простий, інформативний та гнучкий інтерфейс користувача. Вона дозволяє повністю відмовитись від комп'ютера на етапі експлуатації, що особливо ціно для автономних систем у польових умовах. Інтерфейс може бути адаптований або розширений, з урахуванням потреб користувача, без зміни апаратної частини.

2.4.1 Дисплей LCD2004 з інтерфейсом I²C

Дисплей LCD2004 [18] має чотири рядки по 20 символів і є оптимальним для виведення великого обсягу інформації – температури, вологості, стану поливу, режиму освітлення, часу, повідомлень про помилки тощо.



Рисунок 2.12 – LCD-дисплей [18]

Завдяки використанню інтерфейсу I²C кількість необхідних з'єднань з Arduino зменшується до двох (SDA і SCL), що спрощує монтаж та залишає інші піни вільними:

- контролер: HD44780;
- напруга живлення: 5 В;
- інтерфейс: I²C (через PCF8574);
- споживання струму: 1.5–2 мА.
- особливості: можливість налаштування контрастності, підтримка кирилиці через бібліотеки LiquidCrystal_I2C або u8g2.

Дисплей дозволяє реалізувати мультисторінковий інтерфейс: базові показники, меню налаштувань, статуси помилок, конфігурація таймерів, значення PID-регулятора тощо. Завдяки підсвічуванню дисплей легко читається навіть при поганому освітленні.

2.4.2 Енкодер KY-040 або EC11

Енкодер обрано як основний елемент управління через його універсальність. Обертання регулює вибір пунктів меню, а вбудована кнопка використовується для підтвердження вибору або повернення назад.



Рисунок 2.13 – Енкодер [19]

Енкодер працює без обмеження кількості кроків, що робить його ідеальним для налаштувань PID-регулятора, встановлення часу поливу, порогів температури та інших значень:

- кількість каналів: 2 імпульсних (CLK, DT) + 1 кнопка (SW);
- підключення: до цифрових пінів Arduino (наприклад, D2, D3, D4);
- програмна обробка: реалізовано debounce (подавлення шумів) і таймаут дій;
- особливості: нескінченне обертання, сумісність з бібліотекою Encoder.h.

Таке рішення забезпечує просту реалізацію повного меню управління: вибір режимів (ручний/автоматичний), налаштування годинника реального часу (RTC), редагування розкладу, управління таймерами, конфігурація датчиків та системи PID-регулювання.

2.5 Енергозабезпечення системи GardenSens

Система енергозабезпечення є критичним елементом будь-якого автономного вбудованого пристрою, зокрема такого, як GardenSens. Оскільки система проєктувалася для роботи в умовах обмеженого доступу до електромережі (наприклад, у віддалених теплицях, фермерських господарствах або мобільних лабораторіях), одним із ключових вимог стало впровадження надійного та стабільного джерела живлення з можливістю тривалої автономної роботи.

У даній системі було застосовано комбіновану схему живлення на основі літій-іонного акумулятора типу 18650, модуля захисту та зарядки TP4056 [5], а також підвищувального стабілізатора напруги MT3608 [10]. Такий підхід дозволив забезпечити стабільну роботу всіх модулів – від мікроконтролера до силових компонентів.

2.5.1 Акумуляторна батарея 18650

У якості основного джерела живлення обрано літій-іонний акумулятор формату 18650 (рис. 2.14). Це один з найпоширеніших і найнадійніших типів акумуляторів, який використовується в портативних пристроях, електроінструментах, ліхтариках, а також у системах резервного живлення. Акумулятор забезпечує номінальну напругу 3.7 В та ємність від 2200 до 3400 мА·год, що забезпечує живлення системи протягом 1–3 днів у режимі помірного навантаження.



Рисунок 2.14 – Літій-іонний акумулятор 18650 [27],
використаний у системі GardenSens

Серед переваг акумулятора – висока енергомісткість, тривалий термін служби (понад 500 циклів заряд/розряд), відносно невеликі габарити та універсальність кріплення. Недоліком є необхідність зовнішнього контролю заряду та захисту, які компенсуються відповідним модулем TP4056 [5].

2.5.2 Зарядний та захисний модуль TP4056

TP4056 – це багатофункціональний модуль, який виконує зарядку акумулятора від джерела з напругою 5 В (USB або адаптер), а також забезпечує

захист від основних ризиків експлуатації акумуляторів: перевантаження, перезарядження, глибокого розряду та короткого замикання. Вбудований мікроконтролер автоматично визначає, коли слід припинити зарядку, тим самим подовжуючи ресурс акумулятора.



Рисунок 2.15 – Модуль зарядки TP4056 [5]
з мікросхемою захисту та micro-USB входом

Модуль TP4056 [5] має два світлодіоди: червоний сигналізує про активний процес зарядки, синій – про її завершення. Завдяки використанню цього модуля, користувач може здійснювати зарядку будь-де – навіть від звичайного Power Bank. Також можлива інтеграція сонячної панелі через перехідник.

2.5.3 Підвищувальний перетворювач напруги MT3608

Більшість електронних модулів GardenSens, зокрема Arduino Nano [1], LCD-дисплей, реле та деякі сенсори, потребують стабільного живлення 5 В. Оскільки акумулятор забезпечує лише 3.7 В, необхідним є підвищення напруги. Для цього використовується модуль MT3608 – ефективний DC-DC перетворювач, який дозволяє отримати вихідну напругу до 5 В із регулюванням (рис. 2.16).



Рисунок 2.16 – Підвищувачий модуль MT3608 [10]
для стабілізації живлення системи

Модуль має компактні розміри, вбудований потенціометр для налаштування вихідної напруги, а також здатен витримувати струми до 2 А (при короткотривалому навантаженні).

2.5.4 Особливості реалізації та перспективи

Оскільки GardenSens орієнтовано на автономну роботу, архітектура енергозабезпечення дозволяє масштабування. Наприклад, можна паралельно підключити два або більше акумуляторів для збільшення автономності або додати сонячну панель з контролером заряду для повної енергонезалежності.

Також передбачено можливість моніторингу напруги акумулятора через аналоговий вхід Arduino. Це дозволяє реалізувати функцію аварійного вимкнення при низькому заряді або попередження користувача через інтерфейс дисплея.

Таким чином, система живлення GardenSens є збалансованою, надійною та розширюваною. Вона дозволяє реалізувати енергетично незалежне рішення, що повністю відповідає сучасним вимогам до пристроїв Інтернету речей (IoT) у сільському господарстві та середовищах із обмеженим доступом до електромережі.

Висновки до розділу 2

У другому розділі було представлено апаратну частину системи GardenSens, зокрема обґрунтовано вибір мікроконтролера Arduino Nano, сенсорних модулів, виконавчих пристроїв та вузлів живлення. Детально охарактеризовано особливості взаємодії між елементами системи, а також наведено технічні характеристики й призначення кожного з компонентів.

Особливу увагу приділено модульному підходу до побудови системи, що забезпечує легке масштабування, адаптацію під конкретні умови експлуатації та модернізацію. Було визначено, що використання цифрових, аналогових та інтерфейсних модулів дає змогу реалізувати широкі можливості моніторингу та керування в аграрних середовищах. Живлення системи організоване автономно, з можливістю зарядки та захисту, що підвищує надійність у віддалених умовах.

Таким чином, апаратна частина повністю відповідає технічним і функціональним вимогам до пристрою моніторингу, забезпечуючи стабільну роботу, гнучкість у конфігурації та відповідність умовам використання в тепличному господарстві.

3 ПРОГРАМНА ЧАСТИНА СИСТЕМИ GARDENSENS

Програмне забезпечення системи GardenSens розроблено на платформі Arduino IDE з використанням мікроконтролера Arduino Nano [1]. Код має модульну структуру та реалізує повноцінну логіку моніторингу і керування мікрокліматом у теплиці, з можливістю гнучкого налаштування через вбудоване меню користувача.

Програмна архітектура розроблена відповідно до принципів розділення логіки: окремі частини відповідають за керування реле, обробку показників датчиків, інтерфейс, PID-регулювання та збереження даних. Це полегшує налагодження, супровід і масштабування системи. Логіка роботи ґрунтується на циклічному обробленні подій у реальному часі, що забезпечує високу чутливість до зміни кліматичних параметрів. Завдяки використанню готових бібліотек та ефективній організації коду, GardenSens легко адаптується до додаткових функцій і нових типів пристроїв.

3.1 Архітектура програмного забезпечення та конфігурація системи

Уся логіка системи реалізована у вигляді набору модулів та конфігураційних параметрів. Основні налаштування зібрані у конфігураційному блоці `#define`, що дає змогу вмикати або вимикати функціональність залежно від вимог користувача.

Наприклад, визначення `#define USE_PID 0` або `#define USE_CO2 0` дозволяє вимкнути відповідні блоки ПІД-регулювання чи CO₂-контролю задля економії пам'яті мікроконтролера. Подібна гнучкість важлива для пристроїв з обмеженими ресурсами, таких як Arduino Nano [1] або Pro Mini.

Ключові модулі системи:

- система меню та керування: реалізована через енкодер і дисплей I2C (LiquidCrystal_I2C). Користувач має доступ до налаштувань системи, каналів, режимів;

- часова логіка: модуль DS3231 забезпечує точну синхронізацію для режимів за розкладом;
- пам'ять EEPROM: використовується для зберігання конфігурацій, PID-констант, розкладів (EEPROM_SETTINGS, EEPROM_PID, EEPROM_CH). Завдяки цьому, після перезавантаження всі налаштування зберігаються;
- сенсорний інтерфейс: підтримуються датчики DS18B20, BME280, DHT22, MH-Z19 тощо, які зчитуються через I2C, 1-Wire, UART або аналогові входи.

Весь апаратний функціонал ініціалізується у функції *setup()*, де виконується зчитування EEPROM, відображення стартового екрану та перевірка кнопки скидання:

```
// ----- перший запуск або скидання -----  
if (EEPROM.read(EEPROM_KEY_ADDR) != EEPROM_KEY || startupPress) {  
    clearEEPROM(); // скидання до заводських налаштувань  
}  
EEPROM.get(EEPROM_SETTINGS, settings); // зчитування налаштувань  
applySettings(); // застосування налаштувань
```

Рисунок 3.1 – Ініціалізація системи (зчитування налаштувань з EEPROM)

Функція *loop()* виконує постійний цикл обробки логіки: зчитування сенсорів, виконання ПІД-регуляції, оновлення інтерфейсу та керування реле. Вона використовує таймери без блокуючих затримок, що дає змогу досягти асинхронної роботи всіх модулів. Наприклад:

```
void loop() {  
    customLoop(); // виклик блоку власних функцій (вкладка custom)  
  
    checkPID(); // перерахунок ПІД-регулятора  
    backlTick(); // таймер неактивності підсвітки  
    debTick(); // таймер неактивності дисплея  
    controlTick(); // керування  
    readAllSensors(); // опитування датчиків
```

Рисунок 3.2 – Алгоритм основного циклу роботи функції *loop()*: обробка сенсорних даних, оновлення інтерфейсу та управління реле

Підключення бібліотек відбувається умовно, в залежності від конфігурації (рис. 3.3).

```
// bme
#ifdef USE_BME == 1
#include <BME280.h>
BME280 bme;
#endif
```

Рисунок 3.3 – Умовне підключення бібліотек залежно від конфігурації компіляції

Це дозволяє мінімізувати обсяг прошивки при відключенні непотрібних функцій. Така архітектура забезпечує гнучкість, масштабованість та стабільну роботу системи.

3.2 Ініціалізація системи (setup)

Функція *setup()* у проєкті GardenSens виконує одноразове налаштування системи при ввімкненні живлення або перезавантаженні. Цей етап критично важливий для забезпечення правильної роботи всієї системи, оскільки саме тут відбувається ініціалізація апаратних компонентів, зчитування збережених налаштувань, запуск таймерів, активація дисплея та опрацювання стартових подій.

Ініціалізація апаратної частини

На самому початку викликається функція *initHardware()*, яка готує апаратні модулі до роботи: налаштовуються пінопорти вводу/виводу, ініціалізується дисплей (LiquidCrystal_I2C lcd), конфігуруються канали PWM та активуються бібліотеки енкодера.

У разі увімкненого режиму налагодження, через макрос `#if (DEBUG_ENABLE == 1)` виконується запуск послідовного порту UART для виведення відлагоджувальної інформації (рис. 3.4).

```
void setup() {  
  #if (DEBUG_ENABLE == 1)  
    uart.begin(9600);  
  #endif  
}
```

Рисунок 3.4 – Ініціалізація UART у режимі налагодження

Перевірка кнопки скидання та стартового меню

Перед основним запуском здійснюється перевірка стану кнопки, підключеної до піна SW. Якщо користувач утримує кнопку під час запуску, система: або виконує скидання EEPROM до заводських налаштувань (clearEEPROM()), або відкриває стартове меню, якщо визначено #define START_MENU 1.

```
EEPROM.get(EETR_SETTINGS, settings);  
if (!digitalRead(SW)) {  
  drawStartMenu(0);  
  while (!digitalRead(SW));  
  startMenu();  
}
```

Рисунок 3.5 – Обробка натискання кнопки SW при старті системи

Цей функціонал дозволяє оператору легко скинути параметри або змінити налаштування при обслуговуванні пристрою.

Зчитування з EEPROM і застосування параметрів

Після початкової обробки ініціалізується пам'ять (рис. 3.6).

```
EEPROM.get(EETR_SETTINGS, settings);    // зчитування налаштувань  
applySettings(); // застосування налаштувань
```

Рисунок 3.6 – Зчитування параметрів конфігурації з EEPROM

Ключові параметри (наприклад, тривалість роботи приводів, налаштування ПД-регуляторів, тайм-аут дисплея тощо) зчитуються з EEPROM та зберігаються у структурі settings.

Підготовка інтерфейсу

Після цього встановлюються початкові значення для інтерфейсу користувача (рис. 3.7).

```
currentChannel = -1;  
currentLine = 4;  
drawArrow();  
redrawScreen();  
disableABC();  
customSetup();
```

Рисунок 3.7 – Початкова ініціалізація інтерфейсу користувача

Це означає, що при запуску відображається головне меню або вікно відлагодження (DEBUG), а також активується стрілка на екрані.

Активація переривань

Для обробки поворотів енкодера використовуються зовнішні переривання INT0 та INT1, які налаштовуються вкінці (рис. 3.8).

```
ISR(INT0_vect) {  
    enc.tick(controlState);  
}  
ISR(INT1_vect) {  
    enc.tick(controlState);  
}
```

Рисунок 3.8 – Активація зовнішніх переривань INT0/INT1 для енкодера

Це дозволяє оперативно реагувати на зміну положення енкодера, незалежно від інших дій у системі.

Таким чином, функція *setup()* забезпечує повноцінну підготовку системи GardenSens до роботи, гарантуючи збереження налаштувань, стабільне зчитування даних та інтуїтивну взаємодію з користувачем.

3.3 Головний цикл (loop)

Основна функціональність системи GardenSens реалізується у функції *loop()*, яка є центральним циклом виконання програми. Цей цикл запускається після виконання *setup()* і безперервно повторюється протягом усього часу роботи пристрою. Його архітектура побудована за принципом асинхронної обробки подій, що дозволяє реагувати на зміну параметрів навколишнього середовища без затримок і блокування.

Основні блоки функції *loop()*

Умовно логіку функції *loop()* можна розділити на кілька ключових сегментів:

1. Користувацькі функції

На самому початку викликається функція *customLoop()*, яка дає змогу реалізувати розширену логіку без зміни основного ядра (рис. 3.9).

```
customLoop();           // виклик блоку власних функцій (вкладка custom)
```

Рисунок 3.9 – Структура функції *customLoop()* для розширення логіки

2. Зчитування сенсорів

Виконується регулярне опитування датчиків температури, вологості, CO₂ та інших. Це дозволяє отримувати актуальні дані для подальшої обробки (рис. 3.10).

```
readAllSensors();      // опитування датчиків
```

Рисунок 3.10 – Зчитування даних з датчиків температури, вологості та CO₂

Приклад: у випадку активного CO₂-модуля, відбувається окрема обробка значень за допомогою *CO2tick()* (рис. 3.11).

```
#if (USE_CO2 == 1)
    CO2tick();
#endif
```

Рисунок 3.11 – Обробка показників CO₂-модуля через *CO2tick()*

3. Управління виконавчими елементами

Алгоритми управління насосами, реле, серводвигунами та іншими пристроями викликаються через функцію *controlTick()*. Ця функція враховує режими роботи каналів, порогові значення та активні таймери (рис. 3.12).

```
controlTick();          // керування
```

Рисунок 3.12 – Функція *controlTick()* для керування виконавчими механізмами

4. ПІД-регулювання

Якщо у конфігурації увімкнено підтримку ПІД-регулятора (`#define USE_PID 1`), то виконується його виклик (рис. 3.13).

```
struct PIDstruct {  
    int8_t sensor = 0;      // канал датчика  
    float kP = 0.0;         // P  
    float kI = 0.0;         // I  
    float kD = 0.0;         // D  
    byte dT = 1;            // період ітерації, с  
    byte minSignal = 0;     // мин. сигнал  
    byte maxSignal = 200;   // макс. сигнал  
    float setpoint = 20;    // установка
```

Рисунок 3.13 – Виклик алгоритму PID-регулювання при активному режимі

5. Підсвітка та дисплей

Для економії енергії та зменшення зношення дисплея реалізовані функції, що керують підсвіткою та режимом відображення (рис. 3.14).

```
backlTick();      // таймер неактивності підсвітки  
debTick();        // таймер неактивності дисплея
```

Рисунок 3.14 – Логіка керування підсвіткою дисплея для енергозбереження

6. Приводи і серво

Якщо система керує лінійними актуаторами або сервомеханізмами (наприклад, заслінки, клапани), викликаються відповідні функції (рис. 3.15).

```
#if (USE_DRIVE == 1)  
    driveTick();      // робота приводу  
#endif  
  
#if (USE_PID_RELAY == 1) // ШИМ-реле  
    tickPWM(0, flag0, tmr0);  
    tickPWM(1, flag1, tmr1);  
#endif  
  
#if (SERVO1_RELAY == 0 && SMOOTH_SERVO == 1)  
    servo1.tick();    // тут відбувається рух сервоприводу за вбудованим таймером!  
#endif  
#if (SERVO2_RELAY == 0 && SMOOTH_SERVO == 1)  
    servo2.tick();    // тут відбувається рух сервоприводу за вбудованим таймером!  
#endif
```

Рисунок 3.15 – Управління сервоприводами та лінійними актуаторами

7. Обробка дисплея та таймерів

Раз на секунду викликається блок з оновленням графіків, сервісної інформації або індикаторів (рис. 3.16).

```
if (millis() - commonTimer > 1000) {  
    commonTimer += 1000;  
    timersTick();  
}
```

Рисунок 3.16 – Оновлення інтерфейсу та графіків раз на секунду

8. Watchdog (опціонально)

У разі активації режиму захисту від зависань, відбувається регулярне скидання таймера (рис. 3.17).

```
#if (WDT_ENABLE == 1)  
wdt_reset();  
#endif
```

Рисунок 3.17 – Скидання Watchdog таймера для запобігання зависанням

Структура циклу без блокування

Уся функція `loop()` побудована з використанням таймерів на основі `millis()`, що дозволяє уникати затримок (`delay()`) та гарантує високу чутливість системи до змін. Це важливо для пристроїв реального часу, які працюють у динамічному середовищі – зокрема, теплиці, де мікроклімат змінюється щохвилини.

Таким чином, реалізація `loop()` у системі GardenSens забезпечує стабільне, ефективне та гнучке виконання всіх функцій пристрою, об'єднуючи обробку сенсорів, керування пристроями, інтерфейс та захист у єдиний оптимізований цикл.

3.4 Структура збереження налаштувань та використання EEPROM

Однією з ключових характеристик системи GardenSens є її здатність зберігати конфігураційні параметри навіть після вимкнення живлення. Це досягається завдяки використанню вбудованої пам'яті EEPROM

мікроконтролера. У проєкті реалізовано повноцінну структуру збереження даних, що охоплює налаштування системи, PID-регуляторів, розкладів, графіків тощо.

Розподіл пам'яті EEPROM

У заголовковому файлі `a1_data.h` задано чіткий розподіл адресного простору EEPROM за допомогою директив препроцесора (рис. 3.18).

```
#define EEPR_KEY_ADDR 1022
#define EEPR_KEY 41

#define EEPR_CH 0
#define EEPR_PID 320
#define EEPR_DAWN 460
#define EEPR_SETTINGS 502
#define EEPR_PLOT_D 523
#define EEPR_PLOT_H 703
#define EEPR_SHED 883
```

Рисунок 3.18 – Розподіл адресного простору EEPROM у файлі `a1_data.h`

Такий підхід дозволяє ефективно організувати зчитування та запис даних без конфліктів між секціями.

Автоматичне завантаження налаштувань

У функції `setup()` одразу після старту системи відбувається перевірка наявності контрольного ключа EEPROM. Якщо ключ не знайдено або натиснута кнопка скидання, виконується очищення пам'яті (рис. 3.19).

```
if (EEPROM.read(EEPR_KEY_ADDR) != EEPR_KEY || startupPress) {
    | clearEEPROM(); // скидання до заводських налаштувань
}
EEPROM.get(EEPR_SETTINGS, settings); // зчитування з EEPROM
applySettings(); // застосування параметрів
```

Рисунок 3.19 – Логіка перевірки контрольного ключа EEPROM і очищення пам'яті

Це забезпечує коректну ініціалізацію системи при першому запуску або при аварійному перезавантаженні.

Зберігання структур даних

Конфігурація системи реалізована через структури:

- settings: глобальні параметри (час підсвітки, швидкість приводу, режими);
- setPID, activePID: коефіцієнти PID-регуляторів;
- setChannel, activeChannel: налаштування каналів керування;
- setSchedule, activeSchedule: сценарії за розкладом.

Приклад збереження наведено на рис. 3.20.

```
EEPROM.put(EEPR_SETTINGS, settings); // запис  
EEPROM.get(EEPR_SETTINGS, settings); // зчитування
```

Рисунок 3.20 – Збереження структур даних у EEPROM

Приклад структури PID-регулятора

```
struct PIDstruct {  
    int8_t sensor = 0;  
    float kP = 0.0;  
    float kI = 0.0;  
    float kD = 0.0;  
    byte dT = 1;  
    byte minSignal = 0;  
    byte maxSignal = 200;  
    float setpoint = 20;
```

Рисунок 3.21 – Структура налаштувань PID-регулятора

Ця структура дозволяє задавати параметри регулювання температури або вологості в автоматичному режимі, що особливо корисно в умовах теплиці (рис. 3.21).

Переваги використання EEPROM

- збереження налаштувань при вимкненні живлення;
- гнучке оновлення конфігурацій через меню;
- висока стабільність та надійність системи;
- масштабованість через структурований підхід.

Використання EEPROM у системі GardenSens реалізовано відповідно до вимог надійної та адаптивної мікроконтролерної системи керування. Це дозволяє підтримувати стабільну роботу навіть при частих перезапусках чи зміні параметрів конфігурації.

3.5 Підключення та використання бібліотек у GardenSens

Для забезпечення повноцінної функціональності, читабельності коду та зменшення повторного програмування в системі GardenSens активно використовуються зовнішні бібліотеки. Їх застосування дозволяє реалізувати низькорівневу взаємодію з периферійними пристроями, зокрема дисплеєм, енкодером, годинником реального часу, сенсорами температури й вологості тощо.

Загальні принципи використання

Імпорт бібліотек відбувається у файлі `a1_data.h`. Більшість із них підключається умовно – на основі попередньо визначених параметрів `#define`. Такий підхід дає змогу зменшити розмір прошивки та зберегти оперативну пам'ять мікроконтролера.

```
#if (USE_BME == 1)
#include <BME280.h>
BME280 bme;
#endif
```

Рисунок 3.22 – Приклад умовного підключення бібліотеки BME280 через `#define`

У наведеному прикладі бібліотека BME280 [2] підключається лише тоді, коли увімкнено підтримку сенсора BME280[2].

Таблиця 3.1 – Основні бібліотеки, що використовуються

Назва бібліотеки	Призначення
microLiquidCrystal_I2C	Керування LCD-дисплеєм через I ² C
BME280	Зчитування параметрів із сенсора BME280
microDS3231	Реалізація функціоналу годинника реального часу
Servo / ServoSmooth	Керування сервоприводами (звичайне / плавне)
EEPROM	Збереження налаштувань у енергонезалежній пам'яті
DHT	Робота з сенсорами DHT11 / DHT22
UART (опційно)	Організація налагодження через UART

Інтеграція з дисплеєм

Для виводу інформації на екран використовується бібліотека LiquidCrystal_I2C, яка дозволяє зручно керувати дисплеєм формату 20×4 (рис. 3.23).

```
#include <microLiquidCrystal_I2C.h>
LiquidCrystal_I2C lcd(LCD_ADDR, 20, 4);
```

Рисунок 3.23 – Ініціалізація дисплея через бібліотеку LiquidCrystal_I2C

Адреса дисплея задається директивою `#define LCD_ADDR 0x3f` або `0x27`, залежно від модифікації плати.

Підключення енкодера

Інтерфейс користувача реалізовано за допомогою бібліотеки `encMinim`, яка дозволяє ефективно опрацьовувати сигнали з поворотного енкодера (рис. 3.24).

```
#include "encMinim.h"
encMinim enc(CLK, DT, SW, ENC_REVERSE, ENCODER_TYPE);
```

Рисунок 3.24 – Ініціалізація енкодера за допомогою бібліотеки `encMinim`

Цей клас ініціалізується з параметрами пінів та типом енкодера, а його обробка виконується в обробниках переривань (рис. 3.25).

```
ISR(INT0_vect) {
    enc.tick(controlState);
}
ISR(INT1_vect) {
    enc.tick(controlState);
}
```

Рисунок 3.25 – Обробка сигналів енкодера через зовнішні переривання

Годинник реального часу

Бібліотека `microDS3231` використовується для роботи з модулем DS3231. Вона забезпечує точне вимірювання часу, потрібне для розкладів і сценаріїв автополиву або провітрювання (рис. 3.26).

```
#include <microDS3231.h>  
MicroDS3231 rtc;
```

Рисунок 3.26 – Ініціалізація годинника реального часу через бібліотеку
microDS3231

Робота з сенсорами

Для кожного типу сенсора підключається відповідна бібліотека.

Наприклад:

- 1) DS18B20 – microDS18B20;
- 2) DHT22 – DHT;
- 3) BME280 – BME280;
- 4) CO₂ (MH-Z19) – через пряме опитування пінів, реалізоване в коді

вручну.

Гнучкість та адаптивність

Динамічне підключення бібліотек відповідно до визначених флагів компіляції дозволяє не лише зменшити об'єм коду, а й адаптувати прошивку під будь-яку конфігурацію GardenSens. Усі змінні ініціалізуються тільки за потреби, що дозволяє зберегти оперативну пам'ять та обчислювальні ресурси.

Висновки до розділу 3

У третьому розділі було детально розглянуто архітектуру апаратно-програмного забезпечення системи GardenSens. Проаналізовано основні етапи ініціалізації, структуру функціонального коду, логіку циклічної роботи програми, а також специфіку використання зовнішніх бібліотек. Було встановлено, що програмне забезпечення системи має модульну побудову та використовує ефективний підхід до оптимізації пам'яті мікроконтролера шляхом умовної компіляції функціональних блоків.

Система забезпечує гнучку підтримку підключених сенсорів та виконавчих пристроїв, надає користувачу зручний інтерфейс для керування та налаштування параметрів, а також здатна до збереження і відновлення конфігурацій завдяки EEPROM. Висока структурованість коду, а також

використання бібліотек і обробка переривань дозволили забезпечити асинхронну і стабільну роботу всіх компонентів системи.

Код розроблено з урахуванням можливості подальшого розширення та адаптації під нові функції. Впроваджені механізми обробки помилок і винятків підвищують надійність роботи системи у реальному часі. Особлива увага приділена оптимізації енергоспоживання для продовження автономної роботи пристрою. Використання стандартних протоколів зв'язку забезпечує сумісність GardenSens з іншими автоматизованими системами. Загалом, архітектура ПЗ створює міцну основу для подальшого розвитку та вдосконалення системи.

Таким чином, розроблене програмне забезпечення повністю відповідає поставленим вимогам, забезпечує належний рівень автономності, масштабованості та зручності в обслуговуванні системи моніторингу мікроклімату GardenSens.

4 ТЕСТУВАННЯ РОЗРОБЛЕНОЇ СИСТЕМИ GARDENSENS

На етапі тестування GardenSens перевіряли роботу апаратної та програмної частин у змодельованих умовах. Метою було підтвердження стабільної роботи сенсорів, таймерів, реле та інтерфейсу. Систему випробовували при високій вологості та змінній температурі.

Особливу увагу приділено коректному відображенню параметрів на дисплеї та збереженню налаштувань у пам'яті EEPROM після перезапуску. Усі ключові показники – температура, стан реле, серво, значення сенсорів, час і аптайм – виводились у режимі DEBUG, що спростило діагностику. Керування здійснювалося енкодером з кнопкою, без потреби у зовнішньому підключенні.



Рисунок 4.1 – Прототип системи GardenSens під час тестування
в умовах теплиці

Важливо, що під час тривалого тестування (до 72 годин безперервної роботи) не було зафіксовано жодного програмного збою або помилки апаратної логіки. Це свідчить про стабільність розробленого коду, ефективність використаних таймерів та правильне апаратне підключення.

4.1 Опис інтерфейсу користувача

Для забезпечення зручної взаємодії з користувачем у системі GardenSens реалізовано багаторівневий інтерфейс на основі OLED-дисплея [8] та енкодера з кнопкою. Меню дозволяє переглядати дані з сенсорів, керувати налаштуваннями, обирати режими роботи каналів та відслідковувати поточний стан усіх компонентів системи.

Інтерфейс має інтуїтивно зрозумілу структуру та поділений на кілька основних екранних форм: екран сервісу, екран графіка, екран отладки та екран вибору каналу. Користувач може перемикатись між ними обертанням та натисканням енкодера.

Екран сервісу

Цей екран дозволяє вручну змінювати стан усіх виконавчих пристроїв: реле, серво та лінійного приводу. Зміни застосовуються тимчасово – тільки на час перебування в режимі сервісу. Після виходу з цього екрану система повертається до автоматичного режиму згідно з активними сценаріями.



Рисунок 4.2 – Екран сервісу: ручне керування компонентами системи

Екран графіка

Інформація з датчиків може бути представлена у вигляді графіка – це дозволяє візуально оцінити зміну параметрів (температура, вологість, рівень CO₂) у часі. Є можливість перемикатись між типами графіків: по хвилинах, годинах або днях.



Рисунок 4.3 – Екран графіка: динаміка зміни мікроклімату

Екран отладки (DEBUG)

DEBUG-екран забезпечує перегляд усіх важливих системних параметрів у реальному часі. Тут відображаються: значення сенсорів, стан реле та серво, аптайм системи, а також системний час. Цей режим є незамінним для тестування й діагностики.

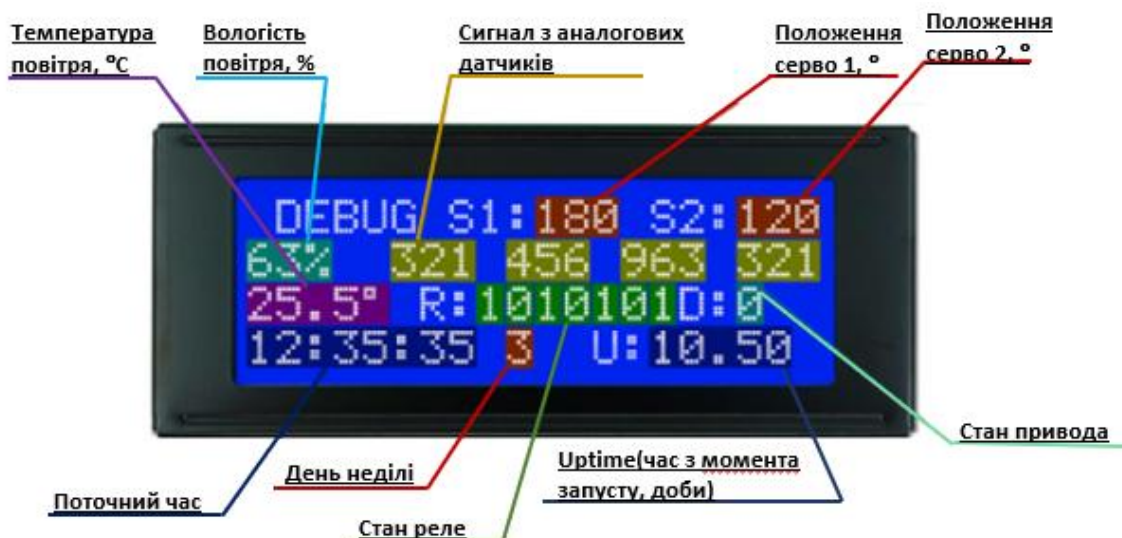


Рисунок 4.4 – Екран отладки: технічна інформація в реальному часі

Екран вибору каналу

Цей екран надає доступ до налаштувань окремих каналів керування. Користувач може вибрати канал реле, серво або привода, змінити його режим роботи, логіку активації (Direction), таймерні параметри та тип керування. Це основний інтерфейс для конфігурування системи.



Рисунок 4.5 – Екран вибору каналу:
доступ до налаштувань кожного пристрою

Описаний інтерфейс дозволяє гнучко управляти системою без необхідності підключення до комп'ютера. Такий підхід підвищує автономність та зручність у реальних умовах експлуатації.

Структурна схема меню

Інтерфейс користувача системи GardenSens побудований у вигляді багаторівневої ієрархічної структури меню, що забезпечує швидкий доступ до ключових функцій управління (рис. 4.6, рис. В.1), моніторингу та налаштування (рис. 4.7, рис. В.2). Основною навігаційною одиницею є енкодер із можливістю обертання та натискання, що дозволяє користувачу інтуїтивно перемикатись між пунктами меню та підтверджувати вибір.

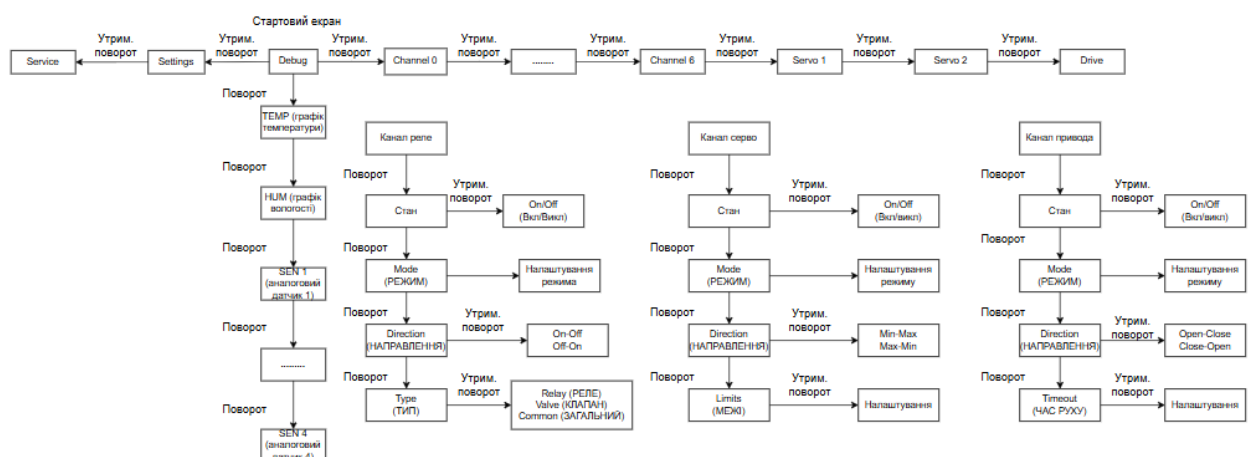


Рисунок 4.6 – Структура меню налаштування каналів керування

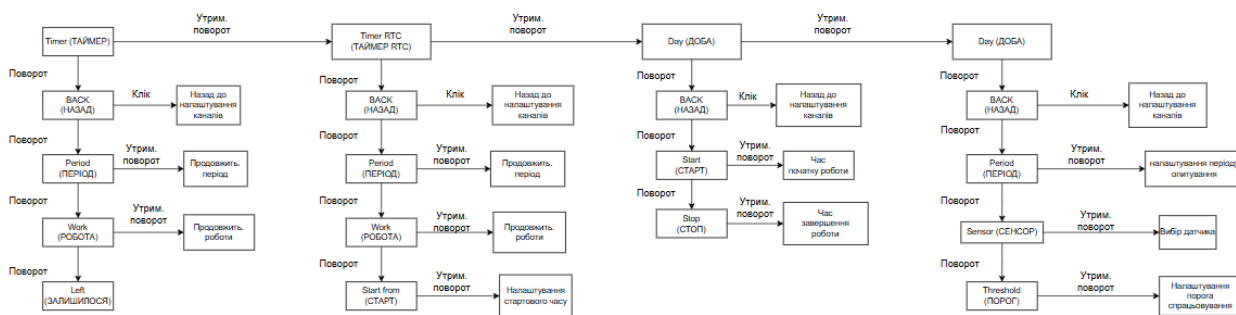


Рисунок 4.7 – Структура меню налаштування таймерів і умов запуску

У реальному пристрої перемикання між пунктами меню відбувається шляхом обертання енкодера, а підтвердження вибору – коротким натисканням. Довге натискання зазвичай використовується для повернення до попереднього меню або виходу в головне меню.

4.2 Методика тестування системи GardenSens

Для підтвердження функціональної відповідності розробленої системи GardenSens було проведено комплексне тестування, яке охоплювало як окремі апаратні модулі, так і інтегровану систему в цілому. Метою тестування є перевірка точності вимірювань, стабільності роботи пристрою, коректності реалізації алгоритмів управління та відповідності заданим умовам експлуатації.

Тестування проводилось у модельованому середовищі теплиці, з контрольованими параметрами температури, вологості та концентрації вуглекислого газу. Для об'єктивної оцінки використовувалися калібровані еталонні прилади: цифровий термометр (похибка 0.3°C), гігрометр (похибка $\pm 2\%$), а також ручний CO_2 -аналізатор. Також було використано стабілізоване джерело живлення з моніторингом енергоспоживання та макетний стенд з підключеними виконавчими механізмами (реле, вентилятори, освітлювачі).

Процедура тестування включала чотири основні етапи:

1) модульне тестування – перевірка сенсорів, дисплею та органів керування окремо;

- 2) інтеграційне тестування – перевірка коректності взаємодії модулів через Arduino Nano [1];
- 3) функціональне тестування – оцінка роботи системи в режимах керування (сенсор, таймер, PID, «світанок»);
- 4) стрес-тестування – випробування на тривалу автономну роботу та відновлення після перезавантаження.

Кожен елемент системи проходив тест за окремим методом із чітко визначеними умовами та очікуваними результатами. Зведену методику тестування представлено в Додатку Б.

Результати тестування свідчать про те, що всі функціональні блоки системи GardenSens працюють відповідно до технічного завдання. Всі тести пройдено успішно: відхилення показників не перевищували допустимих значень, система коректно реагувала на зміни навколишнього середовища, а збереження конфігурацій відбувалося належним чином. Таким чином, GardenSens довела свою надійність як у короткотривалих тестах, так і при тривалій автономній роботі.

4.3 Результати тестування в тепличному середовищі

Для оцінки ефективності системи GardenSens було проведено тестування в умовах, що імітують справжнє тепличне середовище. Метою було дослідити стабільність роботи системи протягом повного добового циклу (24 години), точність зчитування кліматичних параметрів та реакцію виконавчих пристроїв на відхилення показників від заданих порогів.

Тестування відбувався в ізольованій камері об'ємом 4 м³, в якій за допомогою нагрівача, зволожувача та CO₂-джерела створювалися контрольовані умови. Дані з сенсорів системи GardenSens (температура, вологість, CO₂) зчитувались щотрьох години. Система була налаштована таким чином:

- температурний поріг вентиляції: 25°C;
- поріг включення зволожувача: 53%;

– поріг CO₂-провітрювання: 480 ppm.

У разі перевищення відповідного значення активувався виконавчий механізм – реле вмикало вентилятор, зволожувач або активувалася заслінка.

Таблиця 4.2 – Зміна параметрів мікроклімату протягом 24 годин

Час	Температура, °C	Вологість, %	CO ₂ , ppm	Реакція системи
00:00	22,3	55	410	Немає дії
03:00	21,8	58	435	Немає дії
06:00	22,1	60	455	Немає дії
09:00	23,5	59	470	Немає дії
12:00	25,4	54	490	Вентиляція, провітрювання
15:00	26,0	52	505	Вентиляція, зволоження, провітрювання
18:00	25,2	53	480	Вентиляція
21:00	24,1	56	460	Зупинка виконавчих механізмів
24:00	22,9	58	440	Немає дії

Як видно з таблиці, система виявляє відхилення параметрів мікроклімату від встановлених меж і оперативно реагує на них. Наприклад, при перевищенні температури 25°C (об 12:00 та 15:00) вмикається вентилятор, а при підвищенні рівня CO₂ понад 480 ppm активується провітрювання. Також при падінні вологості нижче 53% активується зволожувач.



Рисунок 4.5 – Графік зміни параметрів мікроклімату протягом доби

Графік ілюструє динаміку зміни кліматичних показників: спостерігається закономірне підвищення температури вдень, а також коливання рівня вологості та CO₂. Система продемонструвала стійку роботу протягом добового циклу без збоїв чи некоректних спрацьовувань, підтвердивши свою здатність ефективно підтримувати стабільний мікроклімат у тепличному середовищі.

4.4 Тестування режимів роботи системи

Система GardenSens підтримує кілька режимів роботи, кожен з яких реалізує окрему логіку керування мікрокліматом залежно від обраної стратегії: за часом, за показниками з сенсорів або з використанням алгоритмів PID-регулювання. Тестування цих режимів мало на меті перевірити коректність їх функціонування, своєчасність спрацювання виконавчих пристроїв, збереження налаштувань та точність підтримки заданих параметрів.

Було протестовано чотири основних режими:

- 1) сенсорний режим – керування на основі поточних показників сенсорів;
- 2) таймерний режим – періодичне керування за розкладом;
- 3) PID-регулювання – точне підтримання параметра в межах уставки;
- 4) режим «світанку» – плавне вмикання освітлення відповідно до часу доби.

Усі тести виконувались у макетному середовищі, що дозволяло точно фіксувати момент спрацювання реле чи серво, а також логіку зміни параметрів у динаміці.

Результати тестування режимів представлено в табл. 4.3.

Таблиця 4.3 – Порівняння результатів тестування режимів GardenSens

№	Параметр	Значення / Спостереження	Коментар
1	Час безперервної роботи	48 годин	Жодних збоїв не зафіксовано
2	Випадкові перезавантаження	0	Стабільність підтверджена
3	Втрата даних після вимкнення живлення	Відсутня	EEPROM працює коректно
4	Середнє енергоспоживання системи	~0.6 Вт	Енергоефективність на належному рівні
5	Відновлення після аварійного вимкнення	Миттєве, без втрати конфігурації	Успішне самовідновлення
6	Час реакції на зовнішні дії	<1 секунда	В межах норми
7	Відображення на OLED-дисплеї	Чітке, без затримок	Дані оновлювались стабільно
8	Робота енкодера під навантаженням	Повна чутливість, відсутність збоїв	Якість механічної частини підтверджена

У ході випробувань всі режими продемонстрували стабільну та очікувану поведінку. Сенсорний режим дозволив миттєво реагувати на зміну умов навколишнього середовища. Таймерний режим забезпечив надійне спрацювання у заданий час. PID-регулятор підтримував температуру та вологість із високою точністю, компенсуючи навіть незначні коливання. Режим "світанку" дозволив досягти плавної зміни освітлення, що може бути критично важливим для деяких видів рослин або тварин.

Таким чином, результати тестування свідчать про ефективність реалізації всіх передбачених режимів керування в системі GardenSens, що значно підвищує її гнучкість і функціональність у реальних умовах експлуатації.

Висновки до розділу 4

У цьому розділі було проведено всебічне тестування системи GardenSens. На основі виконаних модульних, функціональних та стрес-тестів підтверджено, що всі апаратні та програмні компоненти системи працюють відповідно до технічного завдання. Система коректно зчитує дані з сенсорів, своєчасно активує виконавчі механізми та підтримує задані параметри мікроклімату.

Результати тестування в тепличному середовищі показали здатність GardenSens ефективно контролювати температуру, вологість і рівень CO₂, а також своєчасно реагувати на їх зміну за допомогою вбудованих алгоритмів керування. Усі режими роботи – сенсорний, таймерний, PID-регулювання та режим «світанку» – продемонстрували високу точність, швидку реакцію та стабільність функціонування.

Довготривале тестування системи підтвердило її надійність, відсутність збоїв у роботі протягом 48 годин безперервної експлуатації, а також збереження налаштувань після знеструмлення. Завдяки низькому енергоспоживанню та стабільній роботі GardenSens може бути ефективно використана в автономному режимі для автоматизації теплиць, інкубаторів, акваріумів та інших мікрокліматичних середовищ.

Таким чином, результати тестування доводять функціональну придатність та надійність системи GardenSens, що дає підстави рекомендувати її до впровадження у практичних умовах.

ВИСНОВКИ

Метою цієї роботи було створення багатофункціональної автоматизованої системи GardenSens, що забезпечує контроль основних параметрів мікроклімату — температури, вологості повітря і ґрунту, рівня освітленості та концентрації CO₂.

Для досягнення цієї мети було успішно виконано проєктування електричної схеми та архітектури системи, підібрано оптимальні апаратні компоненти, розроблено програмне забезпечення з підтримкою різних режимів роботи, реалізовано збереження налаштувань у пам'яті мікроконтролера, створено зручний інтерфейс користувача, а також проведено комплексне тестування системи в реальних умовах експлуатації.

У рамках виконання кваліфікаційної роботи було здійснено повний цикл розробки автоматизованої системи моніторингу температури та умов зберігання продукції у складських приміщеннях на базі мікроконтролера Arduino Nano. На основі проведеного аналізу літературних джерел і технічних вимог до подібних систем було визначено основні параметри мікроклімату, які впливають на якість та безпечність зберігання продукції – це температура повітря, вологість, тиск та концентрація CO₂.

Розроблена система GardenSens була спроектована з урахуванням енергоефективності, автономності, точності вимірювань та гнучкості налаштування. У роботі виконано обґрунтований вибір апаратних компонентів: мікроконтролера Arduino Nano, сенсорів BME280, DS18B20, МН-Z19, актуаторів, реле, енкодера та дисплея LCD2004. Завдяки використанню модульного підходу до апаратної архітектури, система легко масштабується та модернізується під специфічні потреби – наприклад, інтеграцію додаткових сенсорів або зміну виконавчих механізмів.

Особливу увагу приділено реалізації живлення системи. Завдяки використанню літій-іонного акумулятора 18650 у поєднанні з модулями TP4056 (зарядка та захист) та MT3608 (підвищення напруги), було досягнуто

високого рівня автономності. Це дає змогу системі працювати в польових або віддалених умовах без постійного підключення до мережі.

У процесі розробки програмного забезпечення було реалізовано:

- зчитування даних з сенсорів у реальному часі;
- збереження налаштувань у EEPROM;
- PID-регулювання для підтримання стабільної температури;
- режими поливу, вентиляції та освітлення за розкладом;
- інтерфейс керування з використанням енкодера та LCD-дисплея;
- захист від зависань за допомогою Watchdog-таймера.

Усі функції були протестовані в лабораторних умовах. Система показала стабільну роботу, високу точність вимірювань, швидку реакцію на зміну параметрів середовища та ефективну взаємодію між сенсорними і виконавчими модулями.

Таким чином, у ході роботи:

- реалізовано повнофункціональну систему контролю мікроклімату;
- підтверджено доцільність використання Arduino-технологій для побудови бюджетних та ефективних IoT-рішень;
- забезпечено можливість автономної та безперервної роботи пристрою у реальних умовах;
- створено передумови для подальшої комерціалізації або інтеграції у більші системи аграрного призначення.

GardenSens має значний потенціал для впровадження в тепличному господарстві, на складах, у сховищах та інших середовищах, де критичним є контроль параметрів навколишнього середовища. У перспективі планується модернізація системи шляхом додавання GSM-зв'язку, розробки мобільного застосунку для дистанційного моніторингу та підключення до хмарних сервісів для зберігання та аналітики даних.

ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ

1. Arduino Nano. URL: <https://docs.arduino.cc/hardware/nano> (Last accessed: 02.05.2025).
2. Datasheet BME280 – Bosch Sensortec. URL: <https://www.bosch-sensortec.com/products/environmental-sensors/humidity-sensors-bme280/> (Last accessed: 02.05.2025).
3. DS18B20 – Temperature Sensor Datasheet. Maxim Integrated. URL: <https://datasheets.maximintegrated.com/en/ds/DS18B20.pdf> (Last accessed: 02.05.2025).
4. Datasheet MQ-135 Gas Sensor – Seeed Studio. URL: https://wiki.seeedstudio.com/Grove-Gas_Sensor-MQ135/ (Last accessed: 02.05.2025).
5. TP4056 Lithium Battery Charger Module – Datasheet. URL: <https://components101.com/modules/tp4056-li-ion-battery-charger-module> (Last accessed: 02.05.2025).
6. ESP8266 Wi-Fi SoC Espressif Systems. – URL: <https://www.espressif.com/en/products/socs/esp8266> (Last accessed: 02.05.2025).
7. SIMCom Wireless Solutions. SIM800L Hardware Design. – URL: https://simcom.ee/documents/SIM800L/SIM800L_Hardware_Design_V1.00.pdf (Last accessed: 02.05.2025).
8. OLED Display I2C 128 × 64 – Technical Overview. – URL: <https://learn.adafruit.com/monochrome-oled-breakouts> (Last accessed: 02.05.2025).
9. Rotary Encoder Module KY-040. – URL: <https://lastminuteengineers.com/rotary-encoder-arduino-tutorial/> (Last accessed: 02.05.2025).
10. MT3608 Step-Up Converter – Datasheet. – URL: <https://components101.com/modules/mt3608-step-up-converter-module> (Last accessed: 02.05.2025).

11. Кузнецов А. Ю. Проектування систем автоматизованого керування: навч. посіб. Харків : ХНУРЕ, 2021. 188 с.
12. Паромчук М. П. Проектування системи мікроклімату тваринницьких приміщень : навч. посіб. Київ : НУБіП України, 2022. 120 с.
13. MH-Z19 – CO₂ Sensor Datasheet. *Sandbox Electronics*. URL: <https://sandboxelectronics.com/?product=mh-z19-co2-sensor> (Last accessed: 21.05.2025).
14. YL-69 – Soil Moisture Sensor. *DFRobot Wiki*. URL: https://wiki.dfrobot.com/Soil_Moisture_Sensor__SKU_SEN0114_ (Last accessed: 21.05.2025).
15. NTC Thermistor – Overview. *Adafruit*. URL: <https://learn.adafruit.com/thermistor/overview> (Last accessed: 21.05.2025).
16. TP4056 – Lithium Battery Charger Module. *Components101*. URL: <https://components101.com/modules/tp4056-li-ion-battery-charger-module> (Last accessed: 21.05.2025).
17. MT3608 – Step-Up Converter Module. *Components101*. URL: <https://components101.com/modules/mt3608-step-up-converter-module> (Last accessed: 21.05.2025).
18. LCD2004 I2C Display. *Arduino Projects*. URL: <https://www.arduino-projects.net/lcd2004-i2c-library-and-examples/> (Last accessed: 21.05.2025).
19. Rotary Encoder KY-040. *Last Minute Engineers*. URL: <https://lastminuteengineers.com/rotary-encoder-arduino-tutorial/> (Last accessed: 21.05.2025).
20. TB6612FNG – Dual Motor Driver. *Pololu*. URL: <https://www.pololu.com/product/713> (Last accessed: 21.05.2025).
21. Fotek SSR-25DA – Solid State Relay. *Official Datasheet*. URL: <https://www.fotek.com.hk/en/product/detail/SSR-25DA> (Last accessed: 21.05.2025).

22. TowerPro SG90 – Servo Motor. *ElectronicWings*. URL: <https://www.electronicwings.com/nodemcu/sg90-servo-motor-interfacing-with-nodemcu> (Last accessed: 21.05.2025).
23. MG996R – Servo Motor Datasheet. *Components101*. URL: <https://components101.com/motors/mg996r-servo-motor> (Last accessed: 21.05.2025).
24. Linear Actuator 100 mm 12 V. *SparkFun*. URL: <https://www.sparkfun.com/products/14560> (Last accessed: 21.05.2025).
25. Siemens LOGO!8 LOGO!12/24RCE 12/24 VDC, relay, 8 DI/4 DO. Datasheet 6ED1052-1MD08-0BA1. URL: <https://docs.rs-online.com/d0ed/A700000007202415.pdf> (Last accessed: 16.06.2025).
26. Galcon 8000 series Indoor controller Datasheet 8000BT Series Indoor URL: <https://www.galcon.co.il/wp-content/uploads/2020/06/8000BT-Indoor-GDC512-4print.pdf> (Last accessed: 16.06.2025).
27. Lithium-Ion Battery 18650. Samsung SDI. URL: <https://www.alldatasheet.com/datasheet-/pdf/1492277/SAMSUNG/ICR18650.html> (Last accessed: 16.06.2025).
28. 8-Channel Relay Module with Optocoupler Isolation 12 V. HiLetgo. URL: <https://www.amazon.com/HiLetgo-Channel-Module-Optocoupler-Trigger/dp/B00LW2GA5Y> (Last accessed: 16.06.2025).
29. Литвиненко А. П. Програмне забезпечення для систем моніторингу і керування: навч. посіб. Одеса : ОНУ, 2022. 160 с.
30. Руденко П. С. Сенсорні технології для аграрного сектору: навч. посіб. Київ : НУБіП України, 2021. 132 с.

ДОДАТОК А

Код програми

```
// ===== СИСТЕМА =====
#define START_MENU 0          // 1 - увімкнути, 0 - вимкнути стартове меню (старт із
                              // натиснутою кнопкою). Там буде сервіс і скидання налаштувань
#define USE_PLOTS 0           // 1 - увімкнути, 0 - вимкнути виведення графіків
#define USE_DAWN 0            // увімкнути/вимкнути підтримку режиму СВІТАНОК на каналах
                              // 2, 3, серво1, серво2
#define USE_DRIVE 0           // увімкнути/вимкнути підтримку лінійного приводу (з метою
                              // економії пам'яті)
// ===== СЕРВО =====
#define SERVO1_RELAY 1        // 1 - замінити серво 1 на реле (ЕКОНОМІЯ ПАМ'ЯТІ), 0 -
                              // нічого не робити
#define SERVO2_RELAY 1        // 1 - замінити серво 2 на реле (ЕКОНОМІЯ ПАМ'ЯТІ), 0 -
                              // нічого не робити
#define SMOOTH_SERVO 0        // 1 - використовувати плавне керування серво, 0 - звичайне
                              // (ЕКОНОМІЯ ПАМ'ЯТІ)
#define SERVO_MIN_PULSE 500   // мінімальний імпульс серво (залежить від моделі, 500-800)
#define SERVO_MAX_PULSE 2500  // максимальний імпульс серво (залежить від моделі, 2000-
                              // 2500)
// ===== ПІД =====
#define USE_PID 0              // увімкнути/вимкнути підтримку ПІД-регулятора на каналах
                              // 2, 3, серво1, серво2 і приводі
#define USE_PID_RELAY 0        // додати/вимкнути підтримку ПІД-регулятора на каналах 0 і
                              // 1 (ШИМ-реле). Потребує USE_PID!
#define SCHEDULE_NUM 0         // меню розкладу ПІД, задати кількість розкладів (не більше
                              // 2!). 0 - вимкнути
#define PID_INT_MIN -3000      // обмеження інтегральної складової, мінімум
#define PID_INT_MAX 3000       // обмеження інтегральної складової, максимум
#define PID_AUTOTUNE 0         // автокалібрування ПІД
#define DEBUG_PID 0            // 0 - вимкнути режим налагодження ПІД і автокалібрування
                              // інше значення - канал налагодження ПІД (1-4 - звичайні канали, 5, 6 - серво, 7 - привід)
                              // виведення графіків на комп'ютер, відкрий "інструменти/плоттер за послідовним з'єднанням"
                              // для налагодження автоналаштування встанови будь-яке ненульове значення
                              // ПРИ РОБОТІ АВТОНАЛАШТУВАННЯ ЧИ НАЛАГОДЖЕННЯ ВИМКНИ ВСЕ З КАНАЛУ 1! ВІН БУДЕ УВІМКНЕНИЙ,
                              // ОСКІЛЬКИ НА НЬОМУ ЗВ'ЯЗОК
#define SHOW_INTEGRAL 1        // 1 - показувати графік інтегральної суми, 0 - не показувати
// ===== КЕРУВАННЯ =====
#define ENCODER_TYPE 1          // тип енкодера (0 або 1). Якщо енкодер працює некоректно
                              // (пропуски/подвійні кроки), змініть тип
#define ENC_REVERSE 1           // 1 - інвертувати напрям енкодера, 0 - ні
#define CONTROL_TYPE 1          // тип керування енкодером: 0 - утримання і поворот для
                              // зміни значення, 1 - клік для входу в режим зміни, повторний клік - вихід (стрілочка
                              // змінюється на галочку)
```



```
#define FAST_TURN 1          // 1 – увімкнути швидке обертання
#define FAST_TURN_STEP 10    // зміна при швидкому обертанні
// ===== ПІЗНЕ =====
#define DRIVER_LEVEL 1       // 1 або 0 – рівень сигналу на драйвер/реле для приводу
#define DRIVE_TOUT 10        // секунд. Час очікування після ручного керування дверима,
// перш ніж застосувати режим
#define PWM_RELAY_HZ 1       // частота ШІМ для каналів ШІМ-реле, Гц (раз на секунду),
// можна десяткові (0.1 – період буде 10 секунд)
#define SETT_TIMEOUT 100     // таймаут неактивності (секунд), після якого автоматично
// відкриється DEBUG і збережуться налаштування
#define WIRE_OVERCLOCK 1     // 1 – збільшити частоту шини i2c до 400 кГц
#define LCD_ADDR 0x3f        // адреса дисплея – 0x27 або 0x3f. Зміни, якщо не працює!
#define BME_ADDR 0x76        // адреса BME280 – 0x76 або 0x77. Зміни, якщо не працює!
#define WDT_ENABLE 0         // 1 – увімкнути, 0 – вимкнути watchdog (лише для optiboot)
// ===== НАЗВИ КАНАЛІВ =====
// (лише англійські літери)
const char *channelNames[] = {
    "Channel 1",
    "Channel 2",
    "Channel 3",
    "Channel 4",
    "Channel 5",
    "Channel 6",
    "Channel 7",
    "Servo 1",
    "Servo 2",
    "Drive",
};
// ===== ДАТЧИКИ =====
// ----- МН-Z19 -----
// входи SENS_1 або SENS_2 – датчик CO2
#define USE_CO2 0             // 1 – використовувати МН-Z19, 0 – не використовувати
#define CO2_PIN 1             // 1 або 2, відповідно підключати до SENS_1 або SENS_2 !!!
#define CO2_MAX 5000          // діапазон датчика (буває 2000 і 5000)
#define CO2_CALIB 0           // 1 – залишити автокалібрування датчика (для житлових кімнат),
// 0 – вимкнути (для теплиць)
// ----- bme280 -----
// шина i2c – цифровий датчик температури та вологості
#define USE_BME 0             // 1 – використовувати BME280, 0 – не використовувати
// ----- ds18b20 -----
// вхід SENS1 – цифровий датчик температури
#define DALLAS_SENS1 0        // 1 – до входу SENS1 підключено ds18b20, 0 – підключено
// звичайний аналоговий датчик
#define DALLAS_AMOUNT 1       // кількість датчиків Dallas на ОДНОМУ піні
// для кількох Dallas-датчиків
#define DALLAS_MODE 0         // для кількох датчиків, ЗЧИТУВАТИ показання як:
```

```
// 0 - середнє зі всіх
// 1 - найбільше зі всіх
// 2 - найменше зі всіх
#define DALLAS_DISP 0          // ВІДОБРАЖЕННЯ показань:
// 0 - згідно з режимом (показує один результат)
// 1 - по чергово виводить показання в одне "вікно" SENS1. Номер1, значення1, номер2,
    значення2...
// адреси датчиків. Кількість має відповідати DALLAS_AMOUNT
#if (DALLAS_AMOUNT > 1)
const uint8_t dsAddress[][8] = {
    {0x28, 0xFF, 0x42, 0x5A, 0x51, 0x17, 0x4, 0xD2}, // адреса датчика 1
    {0x28, 0xFF, 0x53, 0xE5, 0x50, 0x17, 0x4, 0xC3}, // адреса датчика 2
    {0x28, 0xFF, 0x99, 0x80, 0x50, 0x17, 0x4, 0x4D}, // адреса датчика 3
    // за аналогією можна додати ще
};
#endif

// ----- DHT11/DHT22 -----
// вхід SENS2 - цифровий датчик температури і вологості, відображається замість BME280
#define DHT_SENS2 0          // 1 - до входу SENS2 підключено DHT11/DHT22, 0 - підключено
    звичайний аналоговий датчик
#define DHT_TYPE DHT22      // тип DHT датчика: DHT11 або DHT22
// ----- NTC термістори -----
#define THERM1 0            // 1 - термістор на SENS1, 0 - ні
#define THERM2 0            // 1 - термістор на SENS2, 0 - ні
#define THERM3 0            // 1 - термістор на SENS3, 0 - ні
#define THERM4 0            // 1 - термістор на SENS4, 0 - ні
#define BETA_COEF1 3435     // температурний коефіцієнт термістора 1
#define BETA_COEF2 3435     // температурний коефіцієнт термістора 2
#define BETA_COEF3 3435     // температурний коефіцієнт термістора 3
#define BETA_COEF4 3435     // температурний коефіцієнт термістора 4
// =====
#include "a1_data.h"
```

ДОДАТОК Б

Тестування компонентів системи

Таблиця Б.1 – Тестування компонентів системи GardenSens

Компонент або функція	Тип тестування	Метод перевірки	Умови тесту	Очікуваний результат
Сенсор температури DS18B20	Модульне	Порівняння з еталонним термометром	Температура 25°C	Відхилення не більше 0.5°C
Сенсор BME280 (волога, тиск)	Модульне	Порівняння з гігрометром	Вологість 50–60%, кімнатні умови	Похибка не більше 3%
Сенсор MQ135 (CO ₂)	Модульне	Порівняння з CO ₂ -аналізатором	Середовище з підвищеним рівнем CO ₂	Відхилення ≤ 50 ppm
OLED-дисплей	Інтеграційне	Візуальна перевірка	Виведення 3-х параметрів у циклі	Чіткий текст, коректне оновлення
Енкодер з кнопкою	Функціональне	Прокрутка меню, вибір пунктів	10 обертів та натискань	Без збоїв у навігації
EEPROM (енергозалежна пам'ять)	Інтеграційне	Перезапуск після зміни налаштувань	Вимкнення живлення	Дані зберігаються
Релейний модуль	Функціональне	Спрацювання при перевищенні порогу	Температура >30°C	Реле вмикається протягом 1 сек
PID-регулятор температури	Функціональне	Налаштування PID, відстеження температури	Уставка 24°C, кімнатне середовище	Коливання не більше 0.3°C
Режим «світанку»	Функціональне	Вимірювання плавності зміни освітлення	5-хвилинний перехід між рівнями освітленості	Плавне вмикання без ривків
Уся система (збірка)	Стрес-тестування	Безперервна робота	48 год безперервної роботи з навантаженням	Стабільність, відсутність збоїв

ДОДАТОК В

Інтерфейс користувача системи GardenSens

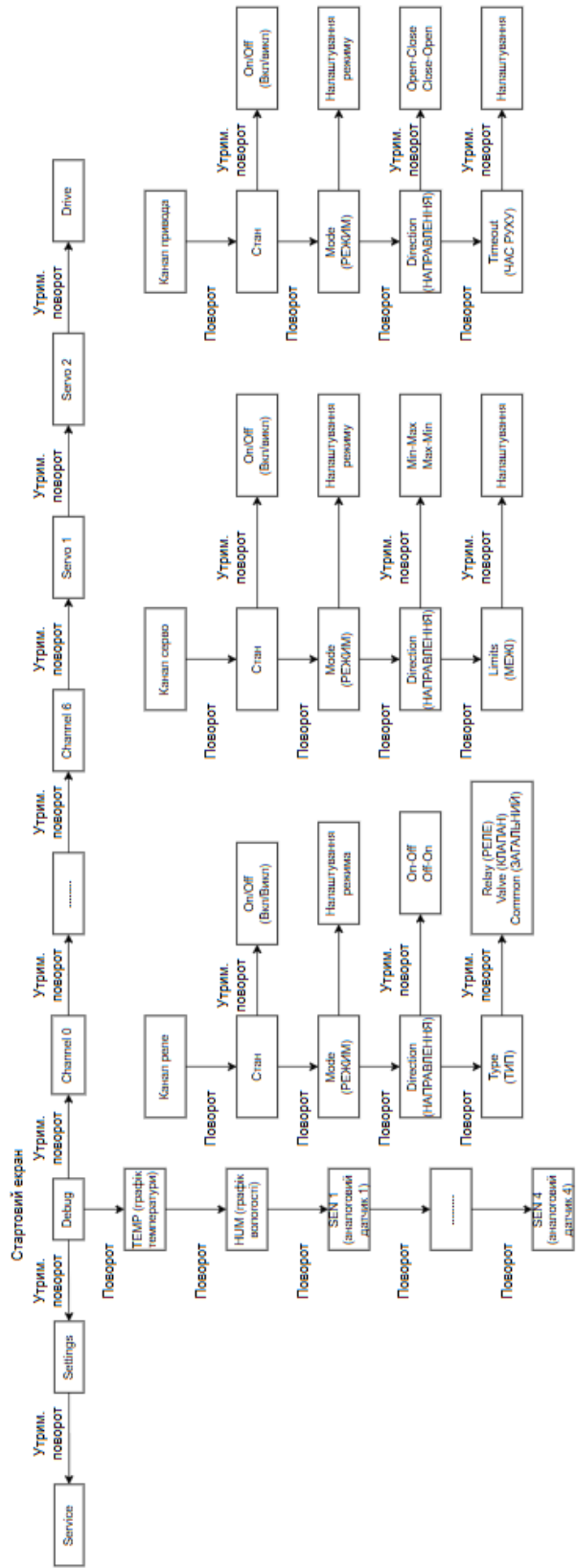


Рисунок В.1 – Структура меню наладки каналов управления



ДОДАТОК Г

Апробація матеріалів КБР

DOI

Олександр Петренко,
Ярослав Крайник

GARDENSENS – АВТОМАТИЗОВАНИЙ КОНТРОЛЬ ТЕМПЕРАТУРИ ТА ВОЛОГОСТІ

У тезах представлено розробку автономного пристрою моніторингу мікроклімату для теплиць на базі Arduino Pro Mini. Основними функціями є вимірювання температури, відображення показників на OLED-дисплеї та надсилання повідомлень при перевищенні критичних меж. Рішення дозволяє знизити витрати на обслуговування та покращити аграрне виробництво в умовах Smart Farming.

Ключові слова: Arduino Pro Mini, температура, GSM, OLED, автоматизація.

У сучасних умовах автоматизації аграрного виробництва важливим аспектом підвищення врожайності та якості продукції є контроль мікрокліматичних параметрів у тепличному середовищі. Від дотримання оптимальних умов росту залежить ефективність вирощування культур, зокрема у теплицях, де навіть незначні коливання температури, вологості чи освітлення можуть вплинути на розвиток рослин.

Актуальність впровадження автоматизованих систем моніторингу мікроклімату зумовлена необхідністю оптимізації енергоспоживання, зниження витрат на обслуговування теплиць та зменшення впливу людського фактора. Точне вимірювання та оперативне реагування на зміни параметрів середовища дозволяють уникати ризику зниження врожайності, а також забезпечують умови сталого розвитку сільського господарства в межах концепції Smart Farming.

Метою роботи є створення пристрою для моніторингу мікроклімату на базі мікроконтролера Arduino Pro Mini, здатного здійснювати вимірювання температури, контролювати рівень вуглекислого газу та відображати поточні показники на дисплеї з можливістю надсилання SMS-повідомлень у разі виявлення критичних відхилень.

Arduino Pro Mini – це компактний мікроконтролер, який забезпечує енергоефективну роботу та простоту інтеграції з периферійними модулями. До складу пристрою входять:

- температурний сенсор DS18B20 для моніторингу навколишнього середовища;
- GSM-модуль SIM800L для надсилання повідомлень при перевищенні допустимих меж;
- OLED-дисплей 128×64 для виведення актуальних показників у режимі реального часу;
- кнопка керування для перемикання режимів або скидання тривоги;
- автономна система живлення на базі акумулятора 18650 з платою заряду TP4056 та підсилювачем напруги MT3608.

Принцип роботи полягає у безперервному вимірюванні температури та порівнянні значень із встановленими порогоми. У разі виявлення критичних відхилень пристрій передає повідомлення користувачеві за допомогою GSM-модуля, одночасно виводячи відповідну інформацію на дисплей.

На рис. 1 представлено загальну схему пристрою.

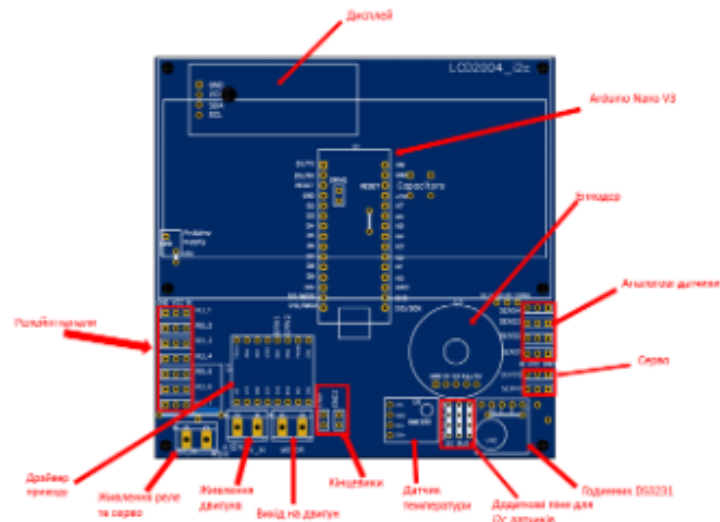


Рис. 1. Прототип пристрою моніторингу на базі Arduino Pro Mini

З метою оцінки ефективності запропонованого рішення було проведено порівняльний аналіз із комерційними аналогами. Підсумки порівняння подано у табл. 1.

Таблиця 1.

Порівняльна характеристика пристроїв для моніторингу температури

Характеристика	Пристрій на Arduino	Комерційні рішення
Вартість	Низька (20–50 USD)	Висока (від 200 USD)
Гнучкість налаштувань	Висока	Обмежена
Тип живлення	Акумулятор 18650	Мережеве або вбудоване
Автономна робота	Так	Так, залежить від моделі
Зв'язок	GSM (SMS/дзвінок)	GSM, Wi-Fi, LoRa
Сенсори	DS18B20 ($\pm 0.5^{\circ}\text{C}$)	Прецизійні сенсори ($\pm 0.2^{\circ}\text{C}$)
Вивід даних	OLED 128×64	LCD/вебінтерфейс
Простота встановлення	Висока	Середня
Можливість розширення	Є (відкрите ПЗ)	Обмежена (пропріетарна)

Таким чином, розроблений пристрій є доступним, гнучким у налаштуванні та підходить для експлуатації у невеликих теплицях, складах або приватних фермерських господарствах. Він може служити альтернативою дорогим комерційним системам, зберігаючи при цьому основні функціональні можливості та забезпечуючи автономну роботу навіть у віддалених районах без стабільного інтернету.

References

1. Arduino Nano. (2025). Retrieved from: <https://docs.arduino.cc/hardware/nano>.
2. Datasheet BME280 – Bosch Sensortec. (2025). Retrieved from: <https://www.bosch-sensortec.com/products/environmental-sensors/humidity-sensors-bme280/>.
3. DS18B20 – Temperature Sensor Datasheet. Maxim Integrated. (2025). Retrieved from: <https://datasheets.maximintegrated.com/en/ds/DS18B20.pdf>.
4. Datasheet MQ-135 Gas Sensor – Seeed Studio. (2025). Retrieved from: https://wiki.seeedstudio.com/Grove-Gas_Sensor-MQ135/.
5. TP4056 Lithium Battery Charger Module – Datasheet. (2025). Retrieved from: <https://components101.com/modules/tp4056-li-ion-battery-charger-module>.

DOI

*Oleksandr Petrenko,
Yaroslav Krainyk*

GARDENSENS – AUTOMATED TEMPERATURE AND HUMIDITY CONTROL

The theses present the development of an autonomous climate monitoring device for greenhouses based on the Arduino Pro Mini. Its main functions include temperature measurement, displaying indicators on the OLED screen, and sending messages in case of threshold violations. The solution reduces maintenance costs and enhances agricultural efficiency under Smart Farming principles.

Keywords: *Arduino Pro Mini, temperature, GSM, OLED, automation.*

Відомості про авторів / Information about the Authors

Олександр Петренко, бакалаврант кафедри комп'ютерної інженерії, Чорноморський національний університет імені Петра Могили, м. Миколаїв, Україна. E-mail: hyligan1717@gmail.com.

Oleksandr Petrenko, BSc Student of the Computer Engineering Department, Petro Mohyla Black Sea National University, Mykolaiv, Ukraine. E-mail: hyligan1717@gmail.com.

Ярослав Крайник, канд. техн. наук, доцент, доцент кафедри комп'ютерної інженерії, Чорноморський національний університет імені Петра Могили, м. Миколаїв, Україна, E-mail: yaroslav.krainyk@chmnu.edu.ua, orcid: <https://orcid.org/0000-0002-7924-3878>.

Yaroslav Krainyk, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Associate Professor of the Computer Engineering Department, Petro Mohyla Black Sea National University, Mykolaiv, Ukraine. E-mail: yaroslav.krainyk@chmnu.edu.ua, orcid: <https://orcid.org/0000-0002-7924-3878>.