

Центральноукраїнський національний технічний університет
Факультет будівництва, транспорту та енергетики
Кафедра «Автоматизації виробничих процесів»

«Допущено до захисту»

Зав. кафедри АВП

к.т.н., доцент

_____ Олександр ДІДИК

« ____ » _____ 2025 р.

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА
за другим (магістерським) рівнем вищої освіти

на тему

**«Дослідження та розробка системи автоматичного регулювання
мікроклімату теплиці з використанням мікроконтролера»**

Виконав здобувач II курсу групи АК-24М
ОПП «Автоматизація та комп'ютерно-
інтегровані технології»

спеціальності 174 «Автоматизація,
комп'ютерно-інтегровані технології та
робототехніка»

_____ Валентин КАЛИНОВСЬКИЙ

« ____ » _____ 2025 р.

Керівник проекту

доцент, канд.техн.наук

_____ Сергій ПЛЄШКОВ

« ____ » _____ 2025 р.

Рецензент

_____ Олег КИСЛУН

« ____ » _____ 2025 р.

м. Кропивницький

Факультет будівництва, транспорту та енергетики

Кафедра автоматизації виробничих процесів

Рівень вищої освіти магістр

Галузь знань 17 Електроніка, автоматизація та електронні комунікації

Спеціальність 174 «Автоматизація, комп'ютерно-інтегровані технології та робототехніка»

Освітньо-професійна програма «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології»

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри Дідик О.К.

“ ” _____ 2025 року

ЗАВДАННЯ НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ ЗА ДРУГИМ (МАГІСТЕРСЬКИМ) РІВНЕМ ВИЩОЇ ОСВІТИ ЗДОБУВАЧА ВИЩОЇ ОСВІТИ

Калиновського Валентина Миколайовича

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи Дослідження та розробка системи автоматичного регулювання мікроклімату теплиці з використанням мікроконтролера

2. Керівник роботи Плешков Сергій Петрович, канд. техн. наук, доцент,

(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

3. Строк подання студентом роботи до захисту 01.12.2025 р.

4. Мета та завдання випускної кваліфікаційної роботи 1. Дослідити вплив основних параметрів мікроклімату (освітленість, температура, вологість повітря, концентрація CO₂, вологість ґрунту) на процеси росту та розвитку рослин; 2. Обґрунтувати вибір методів та датчиків для контролю параметрів мікроклімату; 3. Розробити метод прогнозування параметрів мікроклімату (температури та концентрації CO₂); 4. Розробити алгоритмічне та програмно-апаратне забезпечення системи автоматичного вимірювання та регулювання мікроклімату теплиці на базі мікроконтролера; 5. Математичне моделювання процесу.

5. Консультанти по роботі, із зазначенням розділів роботи

Розділ	Консультант	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
<i>Охорона праці</i>	<i>Жесан Р.В.</i>		

Анотація

на випускнї кваліфікаційнї роботу студента групи АК-24М Калиновського Валентина Миколайовича зі спеціальності 174 «Автоматизація, комп'ютерно-інтегровані технології та робототехніка» на тему: «Дослідження та розробка системи автоматичного регулювання мікроклімату теплиці з використанням мікроконтролера».

У випускнї кваліфікаційнї роботі вирішено актуальне завдання підвищення ефективності функціонування тепличних установок шляхом створення системи автоматичного регулювання мікроклімату на основі мікроконтролера. У роботі проаналізовано сучасні методи та технічні засоби контролю параметрів мікроклімату теплиці. Досліджено вплив основних факторів середовища — освітленості, температури, вологості повітря, концентрації вуглекислого газу та вологості ґрунту — на життєдіяльність рослин і обґрунтовано необхідність комплексного моніторингу цих показників.

Проаналізовано сучасні технології віддаленого доступу та обґрунтовано вибір протоколу для передачі даних у системі моніторингу та керування мікрокліматом. Запропоновано метод прогнозування зміни температури та концентрації CO₂ у теплиці. Розроблено структурну схему, алгоритмічне забезпечення, програмно-апаратний комплекс та прототип системи автоматичного вимірювання й регулювання параметрів мікроклімату з можливістю дистанційного доступу.

Результати роботи можуть бути використані для модернізації існуючих тепличних комплексів, створення навчальних стендів та подальшого розвитку систем автоматизованого агромоніторингу.

Ключові слова: мікроклімат теплиці, автоматичне регулювання, мікроконтролер, система моніторингу, автоматизація.

Summary

on final qualification work of the student of the AK-24M group Kalinovsky Valentyn Mykolayovych in the specialty 174 "Automation, computer-integrated technologies and robotics" on the topic: "Research and development of a system for automatic regulation of the greenhouse microclimate using a microcontroller".

The final qualification work solves the urgent task of increasing the efficiency of the functioning of greenhouse installations by creating a system for automatic regulation of the microclimate based on a microcontroller. The work analyzes modern methods and technical means of controlling the parameters of the greenhouse microclimate. The influence of the main environmental factors - illumination, temperature, air humidity, carbon dioxide concentration and soil moisture - on the vital activity of plants is studied and the need for comprehensive monitoring of these indicators is substantiated.

Modern remote access technologies are analyzed and the choice of a protocol for data transmission in the microclimate monitoring and control system is substantiated. A method for predicting changes in temperature and CO₂ concentration in the greenhouse is proposed. A structural diagram, algorithmic support, software and hardware complex and a prototype of a system for automatic measurement and regulation of microclimate parameters with the possibility of remote access have been developed.

The results of the work can be used to modernize existing greenhouse complexes, create training stands and further develop automated agricultural monitoring systems.

Keywords: greenhouse microclimate, automatic regulation, microcontroller, monitoring system, automation.

ЗМІСТ

ВСТУП.....	2
1. ПРИЗНАЧЕННЯ ТА ОБЛАСТЬ ЗАСТОСУВАННЯ ПРИСТРОЮ	4
1.1 Призначення системи автоматичного регулювання мікроклімату теплиці	4
1.2 Огляд і характеристика основних видів теплиць.....	5
1.3 Область застосування	10
2.ОГЛЯД ІСНУЮЧИХ РІШЕНЬ ТА ОБГРУНТУВАННЯ МЕТОДУ	12
2.1 Аналіз галузі використання теплиць	12
2.2 Системи контролю параметрів мікроклімату в міні-теплицях	20
3 ОИС І ОБГРУНТУВАННЯ ПРОЕКТНИХ РІШЕНЬ.....	24
3.1 Опис функціонування системи	24
3.2 Розробка структурної схеми.....	33
3.3 Розробка функціональної схеми	37
4 РОЗРОБКА БЛОК-СХЕМ ТА АЛГОРИТМІВ ФУНКЦІОНУВАННЯ СИСТЕМИ	39
4.1 Блок-схеми та опис алгоритмів функціонування автоматизованої системи керування теплицею.....	39
5 МЕТОДИКА ВПРОВАДЖЕННЯ СИСТЕМИ В ЕКСПЛУАТАЦІЮ.....	53
ВИСНОВКИ.....	65
СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ.....	66
ДОДАТОК А.....	70

ВСТУП

Актуальність даної теми зумовлена зростанням потреби у підвищенні ефективності вирощування рослин у тепличних умовах, що є важливим чинником розвитку сучасного сільського господарства. Підвищення вартості енергоресурсів, нестабільність кліматичних умов та потреба у забезпеченні стабільних показників урожайності обумовлюють необхідність впровадження технологій автоматизованого контролю та регулювання параметрів мікроклімату. Ефективне керування такими параметрами, як температура, вологість, освітленість, концентрація вуглекислого газу та вологість ґрунту, суттєво впливає на інтенсивність росту рослин та якість отриманої продукції.

Сучасні технічні засоби автоматизації, зокрема мікроконтролери, датчики та модулі зв'язку, дозволяють створювати компактні, енергоефективні та доступні системи контролю мікроклімату. Крім того, розвиток технологій віддаленого доступу відкриває можливості дистанційного керування теплицями та оперативного реагування на зміни зовнішніх умов, що значно підвищує загальну ефективність агротехнологічних процесів.

Метою даної магістерської роботи є дослідження та розробка системи автоматичного регулювання мікроклімату теплиці з використанням мікроконтролера та технології віддаленого доступу.

Об'єктом дослідження є процес формування та підтримання параметрів мікроклімату теплиці для забезпечення оптимальних умов вирощування рослин.

Предметом дослідження є система вимірювання, контролю та автоматичного регулювання мікроклімату теплиці на основі мікроконтролера.

Методи дослідження включають аналіз літературних джерел з питань вимірювання параметрів мікроклімату, електронних засобів автоматизації та технологій віддаленого доступу; методи системного аналізу для вибору технічних засобів; методи математичної обробки даних, зокрема використання

зваженого ковзного середнього для прогнозування параметрів температури та концентрації CO₂; експериментальні методи тестування прототипу системи.

Практичне значення отриманих результатів полягає у створенні прототипу комп'ютеризованої системи автоматичного вимірювання та регулювання параметрів мікроклімату теплиці з можливістю віддаленого доступу. Розроблена система забезпечує комплексний моніторинг стану тепличного середовища, оперативне регулювання параметрів та підвищення ефективності процесу вирощування рослин. Запропоновані рішення можуть бути використані для модернізації існуючих тепличних комплексів, автоматизованих навчальних лабораторій та малих фермерських господарств.

1. ПРИЗНАЧЕННЯ ТА ОБЛАСТЬ ЗАСТОСУВАННЯ ПРИСТРОЮ

1.1 Призначення системи автоматичного регулювання мікроклімату теплиці

В умовах підвищених вимог до ефективності аграрного виробництва автоматизація стає одним із визначальних чинників розвитку сучасного сільського господарства. Це особливо актуально для тепличних господарств, де стабільність мікроклімату безпосередньо впливає на якість та кількість отриманої продукції.

Створена система призначена для автоматичного контролю та регулювання параметрів мікроклімату в теплиці з метою підтримання оптимальних умов для росту й розвитку рослин. Вона здійснює постійний збір даних щодо температури повітря, вологості ґрунту та атмосфери, рівня води в резервуарі, а також керує роботою нагрівальних елементів, охолоджувальних пристроїв, систем поливу, зволоження та осушення повітря.

Система використовує комплекс сенсорів, які відстежують стан внутрішнього середовища, та оперативно реагує на будь-які зміни, що можуть погіршити умови для вирощування рослин. Програмне забезпечення аналізує отримані дані, порівнює їх із заданими нормативами та визначає необхідність активації чи деактивації окремих виконавчих елементів.

На відміну від ручного керування, автоматизована система функціонує цілодобово й забезпечує своєчасну реакцію на будь-які відхилення параметрів. Це дозволяє підтримувати стабільний мікроклімат без участі оператора, зменшуючи експлуатаційні витрати та усуваючи ризики, пов'язані з людським фактором.

До ключових можливостей системи належать:

- збір і оперативна обробка даних від датчиків;
- аналіз показників та їх порівняння з установленими діапазонами;

- автоматичне керування нагрівальними, охолоджувальними та поливальними пристроями;
- відображення актуальної інформації користувачу за допомогою зручного інтерфейсу;
- інформування про критичні або аварійні ситуації.

Система також дає змогу встановлювати індивідуальні параметри для різних видів культур, що забезпечує гнучке налаштування мікроклімату та сприяє підвищенню продуктивності теплиці.

Таким чином, створене програмне забезпечення виконує функцію інтелектуального центру керування теплицею, забезпечуючи точне, безперервне й ефективне управління усіма ключовими процесами з метою досягнення високих агротехнічних результатів.

1.2 Огляд і характеристика основних видів теплиць

Останніми роками людство дедалі частіше стикається з різноманітними кліматичними аномаліями, які змінюють природну рівновагу довкілля. Україна також зазнає впливу нетипових погодних явищ, що раніше траплялися раз на кілька десятиліть. Різкі перепади температури, повені, штормові вітри, тривалі зливи, посухи та інші екстремальні фактори значною мірою позначаються на врожайності сільськогосподарських культур.

Теплиця являє собою штучно створений простір, у якому формуються оптимальні умови для росту рослин. Сучасні конструкції теплиць різняться за режимом використання, формою, габаритами, типом каркаса та технологією вирощування культур [1].

Режим експлуатації визначає період, протягом якого теплиця функціонує. Існують теплиці з обмеженим часом роботи та ті, що здатні працювати постійно. Сезонні теплиці, які зазвичай використовуються з початку весни до пізньої осені, найчастіше застосовуються в приватних господарствах. Рівень

автоматизації в них мінімальний, тому підтримання належних умов повністю покладається на людину, яка доглядає за рослинами.

На відміну від сезонних, цілорічні теплиці функціонують увесь рік і призначені переважно для промислового вирощування культур. Їх розміри залежать від масштабів виробництва. Такі споруди потребують забезпечення стабільного мікроклімату незалежно від зовнішніх умов, а тому характеризуються високим рівнем автоматизації. Це дає можливість формувати багатоконтурні системи контролю кожного технологічного процесу [2].

Форма теплиці визначає кількість природного світла, що надходить усередину, а також впливає на енергоефективність. У промисловості найбільш поширені теплиці прямокутної форми (рисунок 1.1), оскільки вони мають просту й технологічно зрозумілу конструкцію [3].



Рисунок 1.1 - Теплиця прямої форми та реалізація теплиці прямої форми в реальній практиці

Арочні теплиці також користуються значною популярністю, адже їхня форма забезпечує високу стійкість до вітрових навантажень та витримує значну масу опадів (рисунок 1.2). До переваг цього типу належить зменшена площа покриття за збереження робочого простору всередині.

Стрілчасті теплиці є різновидом арочних, але мають загострений дах, який не дозволяє накопичуватися снігу та не перешкоджає проникненню сонячного світла.

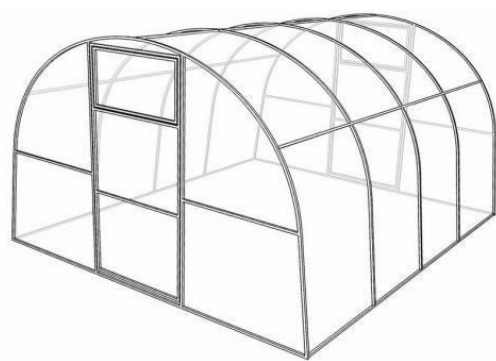


Рисунок 1.2 - Теплиці арочної форми та реалізації теплиці арочної форми в реальній практиці

Купольні теплиці вирізняються надзвичайно високою світлопроникністю та забезпечують значний внутрішній об'єм, що відкриває можливості для гнучкого планування простору. Основним недоліком таких конструкцій є їх висока собівартість і триваліший процес зведення у порівнянні з іншими типами теплиць.

Важливою складовою конструкції теплиці є матеріал покриття. Найчастіше для цього використовують скло або стільниковий полікарбонат.

Скляні теплиці відзначаються високою світлопроникністю, що позитивно впливає на розвиток рослин та дозволяє зменшити витрати на штучне освітлення. Скло має добрі теплоізоляційні властивості та доступну вартість, проте вирізняється значною масою, що обмежує можливості застосування на легких каркасах. До того ж у теплицях зі скляним покриттям повітря швидко нагрівається, що в теплу пору року може спричинити перегрів рослин за недостатньої вентиляції [4].

Стільниковий полікарбонат є найпоширенішим матеріалом, оскільки він забезпечує надійну теплоізоляцію, захищає рослини від надмірного ультрафіолету та має малу вагу. Це значно спрощує монтаж і знижує його вартість. Недоліком полікарбонату є дещо нижча (порівняно зі склом) світлопропускна здатність — 85–90%.

За технологією вирощування теплиці поділяються на кілька типів:

- ґрунтові;
- стелажні;
- безґрунтові.

Ґрунтові теплиці передбачають використання природного ґрунту або спеціально підготовлених ґрунтових сумішей з урахуванням вимог конкретних культур.

У стелажних теплицях рослини розміщують на багаторівневих полицях із бортиками (рисунок 1.3). Такий підхід дозволяє суттєво збільшити корисну площу, хоча обмежує можливість вирощування високорослих культур [5].



Рисунок 1.3 – Стелажні теплиці

Безґрунтові теплиці застосовують дві основні технології: гідропоніку та аеропоніку [6]. У гідропонних системах рослини розвиваються в розчинах поживних речовин, які подаються до інертного субстрату, що виконує роль підтримки кореневої системи [7].

Аеропонний метод не потребує занурення коренів у субстрат — коренева система підвішується у повітрі, а живильний розчин подається у вигляді дрібнодисперсного туману. Це створює кисневе середовище, що сприяє швидкому розвитку рослин [8].

Оскільки в теплицях рослини повністю ізольовані від зовнішніх впливів, усі необхідні умови потрібно забезпечувати за допомогою відповідного обладнання. Підтримання температури здійснюється за допомогою систем опалення, але за перевищення температурою 40 °С рослини починають в'янути і можуть загинути, тому обов'язковим елементом є система вентиляції. Сучасні вентиляційні системи здатні інтегруватися з системою опалення, забезпечуючи стабільний температурний режим незалежно від погодних умов [9].

Одним із ключових чинників успішного вирощування є правильний полив. У ґрунтових теплицях зазвичай застосовують автоматизовані системи крапельного або внутрішньогрунтового зрошення.

Не менш важливою складовою є система штучного освітлення, без якої неможливо повноцінне функціонування рослин. Лампи встановлюються над саджанцями та використовуються в ранковий і вечірній час або в похмуру погоду. Сучасні теплиці оснащують світлодіодними лампами, які випромінюють червоний і синій спектри, що найбільше впливають на процес фотосинтезу (рисунок 1.4).



Рисунок 1.4 – Система штучного освітлення теплиці

Восени, коли природний світловий день значно коротший, штучне освітлення вмикається частіше та забезпечує рослинам необхідний рівень фотосинтетичного потоку [10].

1.3 Область застосування

Сфера використання автоматизованих систем для керування тепличними комплексами охоплює широкий діапазон напрямів — від невеликих приватних ділянок до масштабних аграрних виробництв. Завдяки модульній структурі, гнучким можливостям налаштування та відносно доступній вартості впровадження, така система легко адаптується до будь-якого рівня господарювання [2, 15, 22].

Основні напрями застосування включають:

Приватні теплиці. Невеликі фермерські господарства і дачні теплиці можуть використовувати подібні системи для автоматизації поливу, вентиляції й підтримання температурного режиму, що є особливо корисним у випадках, коли власник не має можливості здійснювати постійний догляд [2, 15, 26].

Аграрні підприємства. Великі виробничі компанії, що займаються вирощуванням овочів, зелені, ягід або декоративних культур у промислових масштабах, потребують високорівневих автоматизованих рішень для оптимізації процесу керування численними теплицями та підвищення продуктивності [3, 7].

Дослідницькі організації. Наукові центри, університети та лабораторії впроваджують такі системи для проведення експериментів із вирощування нових сортів культур чи вивчення реакцій рослин на різні кліматичні фактори [15, 21].

Навчальні заклади. Автоматизовані тепличні комплекси можуть слугувати навчальною платформою для студентів технічних та аграрних спеціальностей, дозволяючи їм набувати практичних навичок роботи з реальними системами керування.

Вертикальні ферми та урбаністичне землеробство. У міських умовах набувають популярності системи розміщення зелених насаджень на дахах, балконах та у спеціалізованих контейнерах. У таких проєктах автономні

системи управління є критично важливими, оскільки зменшують потребу у постійному нагляді [11, 12, 19].

Спеціалізовані закриті середовища. Це стосується теплиць, розташованих у регіонах із важкими кліматичними умовами, де точний контроль мікроклімату є необхідною передумовою для збереження життєздатності рослин [9, 14, 26].

Крім того, система може взаємодіяти з мобільними застосунками, хмарними сервісами або IoT-платформами, що дає змогу здійснювати дистанційний контроль через смартфон чи комп'ютер. У перспективі це створює умови для інтеграції алгоритмів штучного інтелекту, які зможуть автоматично аналізувати зміни середовища та коригувати режими роботи обладнання.

Беручи до уваги актуальні виклики, пов'язані з продовольчою безпекою, дефіцитом робочої сили та кліматичними змінами, впровадження автоматизованих систем управління теплицями є не лише актуальним, а й стратегічно необхідним. Такі системи дозволяють підвищувати ефективність агровиробництва, зменшувати витрати та забезпечувати сталий розвиток господарств.

2.ОГЛЯД ІСНУЮЧИХ РІШЕНЬ ТА ОБГРУНТУВАННЯ МЕТОДУ

2.1 Аналіз галузі використання теплиць

Комп'ютеризація теплиць стала популярною тенденцією у вирощуванні різних культур рослин. Вона може значно підвищити ефективність вирощування рослин в невеликих масштабах і зменшити залежність від додаткових факторів.

Міні-теплиці можуть допомогти людині керувати власним джерелом їжі – вони дають можливість вирощувати, насамперед, овочі, зелень та мікрозелень, які надзвичайно потрібні для збалансованого раціону харчування. Комп'ютеризована система для таких насаджень може спростити щоденну роботу за їх доглядом, виконуючи завдання з регулювання мікроклімату, необхідного для нормального росту та розвитку рослин.

Впровадження розумних технологій у тепличне господарство вимагає обґрунтованого інноваційного підходу. Збір даних повинен бути належним чином налаштований, щоб їх можна було аналізувати. “Смарт-теплиця” створює саморегулюючий мікроклімат, що підходить для росту рослин, завдяки використанню сенсорів, виконавчих механізмів та систем контролю та управління, які оптимізують умови росту та автоматизують процес вирощування.

“Розумні” технології, що застосовуються в тепличному господарстві, можна об'єднати в такі групи [16]:

- точне сільське господарство;
- сільськогосподарські роботи;
- IoT-платформи/IoT-додатки;
- Big Data.

Варто виділити аграрні IoT-платформи та IoT-додатки. Вони дозволяють комп'ютеризувати весь цикл сільськогосподарських операцій із вирощування рослин. На рис. 1.1 показано реалізацію концепції “Розумна міні-теплиця” [16].

відчувають змін погоди, у них немає зовнішнього водопостачання у вигляді дощової води. Отже, водопостачання в міні-теплицях для кімнатних насаджень має бути повністю штучним із впровадженням автоматизованої системи. Існує кілька загальних систем поливу, які відповідають вимогам для різних типів рослин і культур.

Крапельний спосіб поливу є однією з передових систем поливу. Цей метод має функцію подачі води та суміші добрив лише в критичні місця (біля кореня рослини). Вода не бризкає безладно, натомість потрібна кількість води та добрив розподіляється по кожній рослині крапельно, щоб зберегти ґрунт у вологому стані. Крім того, крапельний метод має можливість подавати воду та добрива до рослини чи культури відповідно до щоденних потреб і концентрувати їх у критичній зоні кожної рослини [19].

Перевагою крапельного поливу є висока ефективність використання води. Можна виділити два фактори, які сприяли цьому. Основним фактором є здатність крапельної системи розподіляти воду безпосередньо до кореневої зони кожної рослини. Таким чином мінімізується випаровування, а також зменшується надходження води до зони, де вона не може бути використана рослинами. По-друге, зменшуються витрати на процес поливу. Оскільки вода подається до рослини крапельно, кількість води, яка необхідна рослині на день, можна легко контролювати. Контроль набагато легший порівняно з іншими методами через відносно повільний потік води. Крім того, ефективність використання води для крапельного методу є найвищою (від 85 % до 95 %) порівняно зі спринклерним і поверхневим методами, які мають максимальну ефективність на рівні 80% і 70% відповідно [19].

Однак цей метод має деякі недоліки з точки зору вартості, а також навичок, зокрема:

- висока початкова вартість розробки та встановлення. Оскільки цей метод потребує кількох технологій для контролю потоку води, щоб задовольнити добову потребу для різних типів рослин, потрібно кілька автоматизованих систем;

– реалізація такої системи досить складна, оскільки метод включає використання численних технологій;

– більша ймовірність засмічення та пошкодження обладнання, особливо труб, порівняно з методами розпилення. Це відбувається тому, що крапельний спосіб завжди працює разом із підживленням. Дрібні частинки у воді можуть накопичуватися на кожному виході (маленьких отворах для стікання води) труб, що може призвести до засмічення труби.

Спринклерна система здійснює полив, імітуючи дощ. Вона дозволяє розпилювати воду з великою площею покриття рослин або культур. Вода буде подаватись до рослин через труби та розбризкуватись у повітря за допомогою кількох спринклерів, створюючи невеликі краплі води, схожі на природний дощ [19].

Переваги спринклерного способу поливу такі:

– обладнання та загальна установка цього методу є доступною та вимагає мінімальних професійних навичок порівняно з крапельними методами;

– цей метод вимагає менше обладнання, тому він насправді легший з точки зору механізації та автоматизації;

– не займає багато місця.

Однак цей метод також має деякі недоліки, такі як:

– високі експлуатаційні витрати через високий тиск, необхідний для рівномірної подачі води через кожен спринклер;

– вода, яка розпилюється в повітря, буде піддаватися додатковому впливу зовнішніх чинників, що може призвести до втрат води;

– вода з великою кількістю домішок, таких як сіль і пісок, може спричинити проблеми з спринклером, наприклад засмічення.

Враховуючи габарити міні-теплиці, найкращим методом для поливу рослин буде поверхневе зрошення ґрунту, при якому листя рослин не будуть намокати, щоб вберегти їх від ураження шкідливими бактеріями та грибками.

Серед основних вимог для росту рослин, джерело світла є основним фактором, який запускає процес фотосинтезу в усіх зелених рослинах. Таким

чином, якість і кількість світла є важливими факторами, які впливають на ріст рослин з точки зору морфогенезу та диференціювання рослинних клітин, тканин і органів.

Ріст рослини сильно залежить від довжини світлової хвилі, яка досягає її поверхні. Якість світла стосується червоного та синього світла, які найбільше впливають на ріст, оскільки вони є основним джерелом енергії для фотосинтетичної асиміляції CO₂ в рослинах. Однак, дослідження також доводять, що зелене світло також впливає на ріст рослин [17].

Два найпоширеніших джерела світла: люмінесцентне та світлодіодне світло, які зазвичай застосовуються у рослинництві.

Люмінесцентне світло – це тип штучного джерела світла, який містить гази всередині трубки лампи, такі як ртуть, аргон, ксенон та інші. Тиск газу в трубці лампи відносно низький, приблизно 0,3 % атмосферного тиску [17].

Існує кілька типів люмінесцентного світла, наприклад компактна люмінесцентна лампа (КЛЛ) і холодні білі люмінесцентні лампи. Холодна біла флуоресценція має випромінювання світла зі значною довжиною хвилі від 400 нм до 700 нм. Однак діапазон 400 нм – 500 нм демонструє велике значення з точки зору опромінення, яке становить 1,47 Вт/м² або 25% загального випромінювання. Крім того, випромінювання світла від цього типу люмінесцентних ламп сильніше в синій області, що сприяє росту рослин. До того ж такий тип ламп недорогий і простий у застосуванні для міні-теплиці [17].

Світлодіод (LED) – це тверdotілий напівпровідниковий діод, здатний вивільняти енергію у вигляді фотонів після отримання певної напруги. Це також ідеальна система освітлення для вирощування рослин, для якої необхідне штучне освітлення. Пікова довжина хвилі світлодіодних ламп коливається від 250 до 1000 нм [17].

Довжина хвилі та кількість світла, що застосовуються до зелених овочів, безпосередньо впливатимуть на фотосинтез, ріст, а також харчову цінність. Наприклад, коли дальнє червоне світло (700 - 740 нм) використовувалося для

вирощування салату, загальна концентрація хлорофілу для рослини була нижчою на 14 % порівняно з білими флуоресцентними лампами. Крім того, концентрація антоціанів і каротиноїдів у рослинах салату під дальнім червоним світлом також демонструє значення, яке на 40 % нижче порівняно з тим самим видом рослин під білою флуоресцентною лампою. Однак, якщо довжину хвилі, застосовану до рослини салату, зменшити до 625–700 нм, що відповідає умовам червоного світла, концентрація фенолу може досягти збільшення на 6 % [17].

Основними перевагами застосування світлодіодного освітлення в міні-теплиці є:

- LED освітлення є більш енергоефективним у порівнянні з іншими типами освітлювальних систем. Світлова віддача світлодіодів із перетворенням фосфору може досягати 200 лм/Вт при стандартній робочій щільності струму 35 А/см² порівняно з лампами розжарювання та люмінесцентними лампами при 20 лм/Вт і 104 лм/Вт відповідно;

- LED лампа має здатність рівномірно розподіляти світло. Ця здатність сприяє рівномірному освітленню по всій площі, щоб кожна рослина в міні-теплиці могла отримати однакову кількість світла для кращого росту;

- LED освітлення має чудовий термін служби продукту. Звичайна світлодіодна лампа має термін служби від 30000 до 60000 годин у порівнянні з флуоресцентною лампою, яка має лише близько від 8000 до 10000 годин.

Однак застосування світлодіодного світла також має кілька недоліків, таких як:

- світлодіоди не віддають тепло навколишньому середовищу. Однак тепло накопичується в напівпровіднику світлодіодного пристрою. Крім того, ККД світлодіодів від розетки знаходиться в діапазоні від 5% до 40%, що означає, що решта енергії (60%-95%) втрачається у вигляді тепла. А також перегрів у напівпровідниках також зменшить термін служби світлодіодів;

- початкова вартість міні-теплиці зі світлодіодною системою освітлення буде високою через те, що світлодіоди зазвичай дорожчі порівняно з іншими системами освітлення.

Система вентиляції в міні-теплиці являє собою відкритий канал, який забезпечує повітрообмін між зовнішньою атмосферою і внутрішнім простором міні-теплиці. Крім того, система вентиляції також важлива, коли йдеться про регулювання температури та вологості в міні-теплиці. Відкритий канал забезпечує циркуляцію повітря та виводить надмірне тепло, а також вологу, які накопичилися всередині міні-теплиці, у атмосферу. Також хороша система вентиляції може запобігти виснаженню мінеральних речовин урожаю, а також захворюванням, спричиненим грибками [19].

Існують різні типи систем вентиляції, які відповідають різним кліматичним і атмосферним умовам. Серед численних моделей вентиляції найбільш поширеними є природна та вентиляторна.

Природна вентиляція – це тип пасивної вентиляційної системи, яка забезпечує рух повітря для підтримки температури всередині міні-теплиці якомога нижчої, порівняно із зовнішньою температурою. З іншого боку, вентиляторна, яку можна розглядати як примусову вентиляцію, стимулює потік повітря за допомогою механічного обладнання, такого як вентилятори, для регулювання температури та вологості в міні-теплиці.

Технологічні процеси та розумне управління в сучасних міні-теплицях

Розробці та впровадженню сучасних технологій для реалізації міні-теплиць присвячено ряд публікацій. Зокрема, автори у статті [1] обґрунтовують конструкцію автоматичної системи керування поливом для міні-теплиці на базі мікроконтролера Arduino Nano. До нього підключається модуль давача температури та вологи DHT22, а також сенсор вологості ґрунту (гігрометр). Керування подачею води відбувається за допомогою модуля реле, мембранного насоса та магнітного електрично клапана 1/2 дюйма.

Серед недоліків цієї роботи можна виділити те, що не передбачено здійснення вимірювання та регулювання таких параметрів як вміст CO₂ в повітрі та освітленість всередині міні-теплиці.

На рисунку 2.2 зображено схему для вбудованої комп'ютеризованої системи, яка збирає дані про довкілля за допомогою сенсорів і зберігає їх у цифровій хмарі [17].



Рисунок 2.2 - Топологія розумної міні-теплиці

У якості цифрової хмари виступає IoT платформа Blynk, яка характеризується надійністю та безпекою даних. Протокол, який використовується для зв'язку між мікроконтролером і цифровою хмарою – це MQTT (Message Queue Telemetry Transport). Цей протокол широко використовується в програмах для забезпечення швидкості та надійності трафіку даних і працює асинхронно між пристроями, що робить його одним із найпоширеніших протоколів у проектах IoT.

Досить популярним рішенням реалізації апаратного забезпечення системи автоматичного керування процесами в міні-теплиці є використання як головного контролера Arduino Nano, сенсора для вимірювання температури та вологості повітря BME280, 4 аналогових датчиків вологості ґрунту та інших параметрів, модуля реального часу RTC DS3231, LCD дисплею та енкодера як органа керування. На базі цього розробляється відповідне програмне забезпечення [8].

Авторами [4] також описані основні параметри тепличного клімату, підібрані відповідні датчики та виконавчі механізми з модулями реле до них,

наведено функціональні вимоги до програми, що відстежує кліматичні умови всередині міні-теплиці.

На рисунку 2.3 зображено структурну схему системи контролю мікроклімату міні-теплиці на базі мікроконтролера Arduino [4].

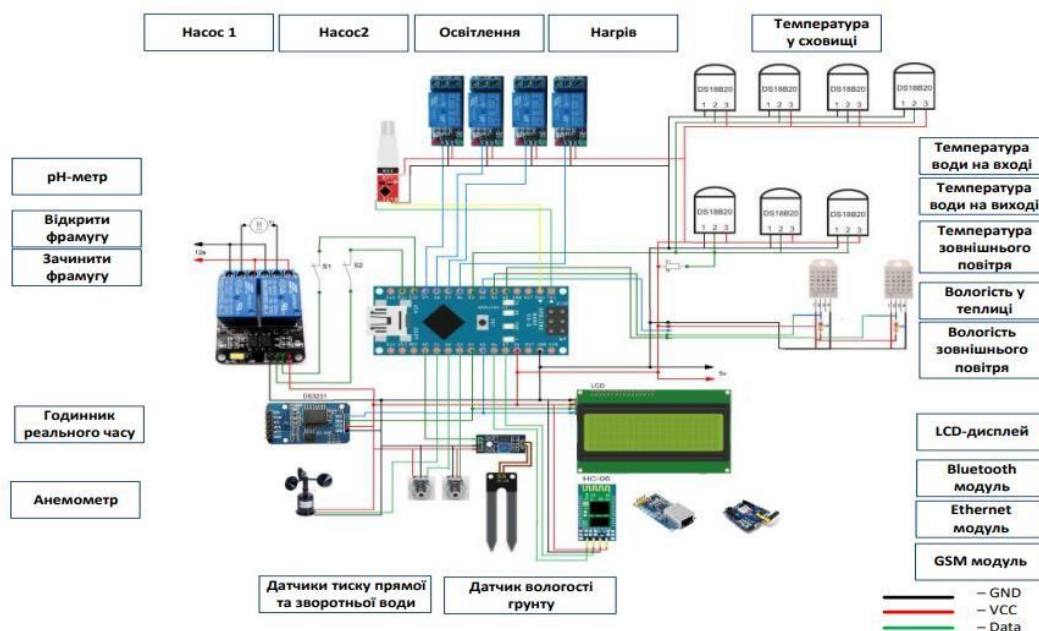


Рисунок 2.3 - Структурна схема системи керування параметрів мікроклімату теплиці

Втіленню концепції Інтернету речей в пристрої для автоматизованого вирощування окремого виду рослини на прикладі лаванди у міні-теплиці описано в [14]. Проте, як саме відбувається інтеграція IoT у розроблюваний пристрій, які протоколи використовуються, авторами [14] не описано.

2.2 Системи контролю параметрів мікроклімату в міні-теплицях

Існують готові реалізації систем контролю мікроклімату міні-теплиць, наприклад таких компаній, як Grow Director Ltd., Harvst та інших.

Grow Director Ltd. – ізраїльська компанія, яка спеціалізується на розробці інтелектуальних систем клімат-контролю для закритого та тепличного садівництва. Зокрема GrowDirector 3 PRO – це їхнє рішення для автоматизації

та керування даними, яке постачається у вигляді повністю модульного пакету бездротових контролерів, сенсорів і програмного забезпечення на основі штучного інтелекту, призначеного для спрощення вирощування рослин [21]. Також у їхньому асортименті є декілька комплектів, наприклад, “HydroBasic Kit” (рисунок 2.4). Він позиціонується як простий інструмент для початківців і напівпрофесіоналів для автоматизації гідропонних операцій.



Рисунок 2.4 - Комплект “HydroBasic” від компанії Grow Director

Цей набір включає один контролер HydroDirector, який поставляється в комплекті з двома гідропонними давачами – рН і ЕС, необхідними для підтримки належного рівня поживних речовин у гідропонній системі.

Також вони розробили власне програмне забезпечення (ПЗ) для керування всім обладнанням, пристроями та сенсорами, інтегрованими в систему GrowDirector 3 PRO (рисунок 2.5).

GrowDirector 3 PRO – це повністю автоматизована система управління навколишнім середовищем, яка підтримує машинне навчання. Недоліками цієї системи є малий набір сенсорів, що не дає можливості керувати всіма параметрами мікроклімату, а також висока вартість.

Harvst – британська компанія, яка спеціалізується на розумних міні-теплицях. Вона виготовляє мініатюрні прозорі акрилові теплиці (рисунок 2.6) [25]. Модель клімат-контролю оснащена системою примусової вентиляції в стандартній комплектації, яка запобігає перегріванню рослин влітку.

Асортимент S-серії міні-теплиць включає вбудований автоматичний полив, обігрів та освітлення. Крім того, за допомогою регульованих полиць можна змінити міні-теплицю відповідно до насаджень [25].

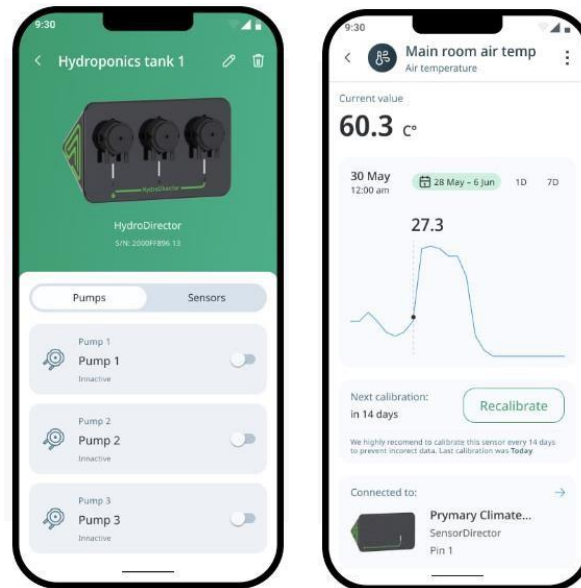


Рисунок 2.5 - Мобільний додаток GrowDirector 3 PRO



Рисунок 2.6 - Вигляд міні-теплиці Harvest Sprout S8

Так як такі готові рішення є досить недешевими, компанія пропонує також комплект WaterMate (рисунок 2.7) – універсальну розумну систему поливу на сонячних батареях, яка підійде майже до будь-якої теплиці [25].

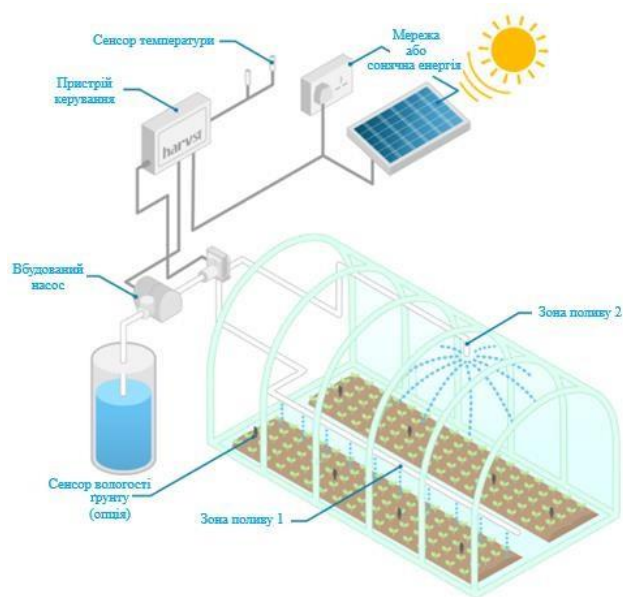


Рисунок 2.7 - Схема системи автоматичного поливу WaterMate

Ця автоматична система використовує комбінації таймерів і сенсорів навколишнього середовища, забезпечуючи рослинам потрібну кількість води.

Усі параметри поливу, опалення та освітлення для інтелектуальної системи керування Harvst керуються за допомогою мобільного додатку, який працює як на iPhone, так і на Android. До того ж, якщо блок керування розумною міні-теплицею Harvst знаходиться в зоні дії мережі Wi-Fi, він може надсилати інформацію про температуру, полив, обігрів тощо до онлайн облікового запису. Проте недоліком цього комплекту автоматичного поливу все ще залишається висока ціна. Тому реалізація дешевих та, одночасно, ефективних варіантів систем контролю параметрів мікроклімату для міні-теплиць є актуальною задачею.

3 ОПИС І ОБҐРУНТУВАННЯ ПРОЕКТНИХ РІШЕНЬ

3.1 Опис функціонування системи

Розроблена автоматизована система контролю мікроклімату теплиці призначена для підтримання оптимальних умов, необхідних для нормального росту й розвитку рослин. Основна концепція полягає у безперервному отриманні даних про ключові параметри внутрішнього середовища, їх подальшому аналізі та автоматичному впливі на виконавчі механізми з метою стабілізації цих показників. Система функціонує за принципом замкненого циклу: датчики фіксують поточні характеристики повітря, контролер обробляє інформацію і приймає рішення, а виконавчі пристрої виконують коригувальні дії для підтримання встановлених режимів. Завдяки цьому мінімізується участь людини та підвищується рівень автоматизації.

До складу системи входять сенсорні вузли, керуючий модуль на базі мікроконтролера Arduino із відповідним програмним забезпеченням, виконавчі агрегати та користувацький інтерфейс. Сенсорні вузли включають датчики температури, вологості повітря й, за необхідності, рівня живильного розчину. Сигнали з них надходять до контролера у вигляді аналогових або цифрових даних, де проходять оцифрування та підготовку до подальшої обробки. Контролер реалізує алгоритми підтримання необхідних параметрів, керуючи вентиляторами, нагрівачами, зволожувачами та насосами, що забезпечують циркуляцію розчину.

Інтерфейс користувача реалізовано у формі комп'ютерної програми або веб-порталу, що дозволяє здійснювати налаштування режимів, стежити за показниками та взаємодіяти з системою в реальному часі.

Система працює циклічно, дотримуючись послідовності «зчитування – аналіз – керування». Контролер періодично опитує всі сенсори, отримуючи актуальні дані про параметри мікроклімату. Інформація попередньо обробляється: виконується згладжування, фільтрація та усунення завад, а також перевірка достовірності даних для виключення помилок, спричинених можливими збоями датчиків. На етапі аналізу отримані значення порівнюються

із заданими оптимальними межами, встановленими відповідно до вимог конкретної культури.

Згідно з результатами аналізу контролер формує команди для виконавчих механізмів. Наприклад, за надмірного підвищення температури активується вентиляція; при надто низькій температурі включається нагрів. Якщо рівень вологості падає нижче допустимого, запускаються зволожувачі або полив. Коли ж рівень живильного розчину у резервуарі стає недостатнім, контролер подає сигнал насосу для його відновлення. Після виконання команд система оновлює дані про свій стан у пам'яті контролера та в інтерфейсі, після чого розпочинає новий цикл моніторингу.

Таким чином забезпечується постійний зворотний зв'язок, що дозволяє оперативно реагувати на зміни умов і підтримувати стабільний мікроклімат, необхідний для ефективного вирощування рослин.

Схема всієї системи, із теплицею включно зображено на рисунку 3.1:

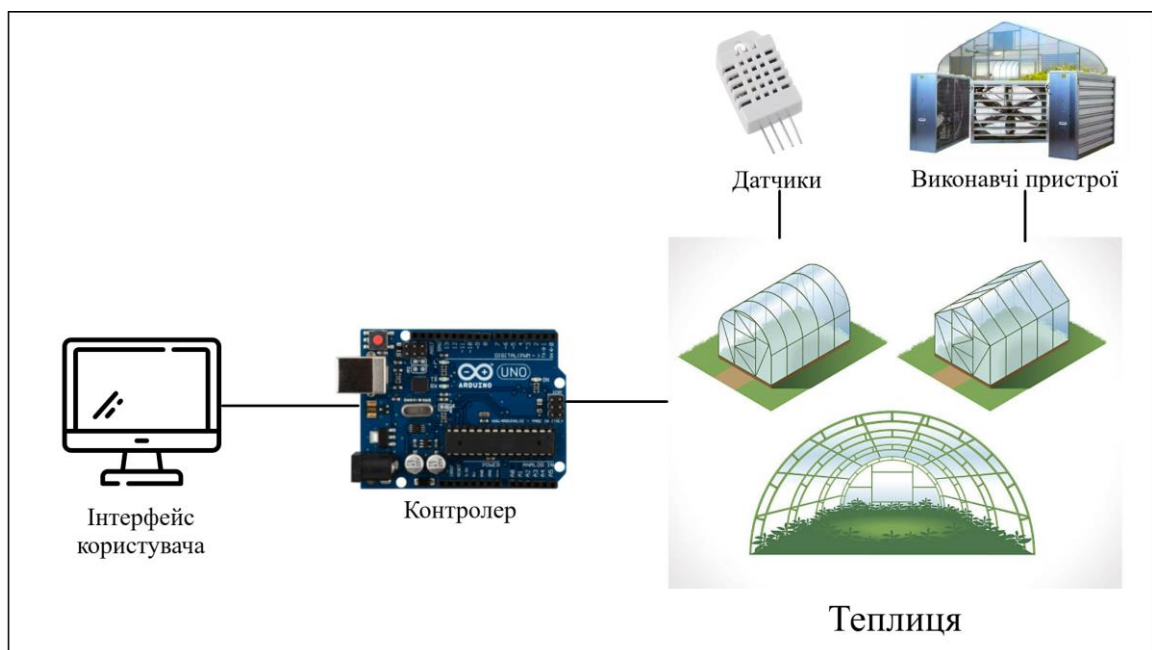


Рисунок 3.1 – Схема розробленої системи

Arduino — це апаратно-програмна платформа, що має відкритий вихідний код і відзначається легкістю у використанні. Завдяки цьому вона здобула широку

популярність серед розробників та ентузіастів електроніки в усьому світі. Ця технологія дозволяє створювати різноманітні електронні пристрої за доступною ціною — від найпростіших схем до складних автоматизованих систем управління.

Існує безліч різновидів плат Arduino, які можна умовно розділити на дві категорії: контролери та плати розширення. Контролери є основними елементами, у яких зберігаються та виконуються програми (рисунок 3.2). У свою чергу, плати розширення використовуються для підключення додаткових периферійних модулів, що взаємодіють із контролером (рисунок 3.3).



Рисунок 3.2 – Плата Arduino Uno R3

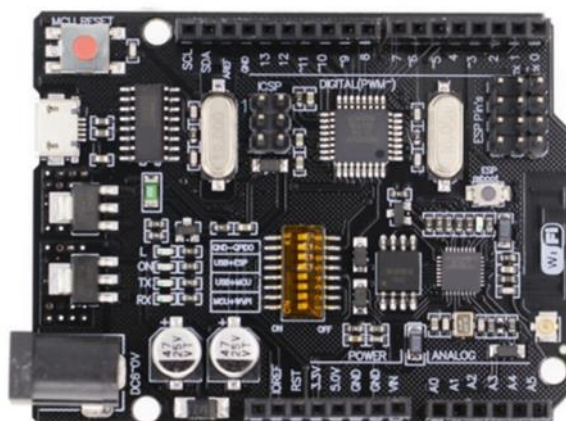


Рисунок 3.3 – Плата розширення Arduino Wi-Fi

Серед численних моделей Arduino для реалізації даного проєкту було обрано одну з найпопулярніших — Arduino Uno R3 (рисунок 3.2). Вона побудована на базі мікроконтролера ATmega328 і має всі необхідні компоненти для зручної роботи: 14 цифрових входів/виходів (з яких 6 підтримують ШІМ), 6 аналогових входів, кварцовий резонатор на 16 МГц, роз'єм USB, а також роз'єми для живлення та програмування (ICSP). Основні технічні характеристики наведені в Таблиці 3.1 [33; 34; 45].

Таблиця 3.1 – Технічні характеристики Arduino Uno R3

Мікропроцесор	ATmega328
Робоча напруга	5 В
Вхідна напруга (рекомендована)	7 – 12 В
Вхідна напруга (максимальна)	6 – 20 В
Цифрові Входи/Виходи	14
Аналогові входи	6
Максимальний струм одного виходу	40 мА
Flash-пам'ять	32 КБ (ATmega328), 0.5 КБ зарезервовано завантажувачем
SRAM	2 КБ (ATmega328)
EEPROM	1 КБ (ATmega328)
Тактова частота	16 МГц

Живлення плати може здійснюватися кількома способами: через контакти Vin/GND, через зовнішній адаптер живлення або через USB-інтерфейс. Контакти Vin та GND можуть бути використані для підключення зовнішнього джерела живлення, наприклад, акумулятора. Крім того, плата підтримує підключення через стандартний мережевий адаптер AC/DC з роз'ємом 2.1 мм. Оптимальна напруга для живлення плати знаходиться в межах 7–12 В, оскільки нижчі значення можуть призвести до нестабільної роботи, а вищі — до перегріву стабілізатора [33; 34; 45].

Найбільш простим і зручним способом живлення є підключення через USB-кабель, що дозволяє використовувати як стаціонарні, так і портативні джерела живлення, наприклад, зовнішні акумулятори.

Більшість виходів плати можуть виконувати різні функції, що зображено на схемі (рисунк 3.4).

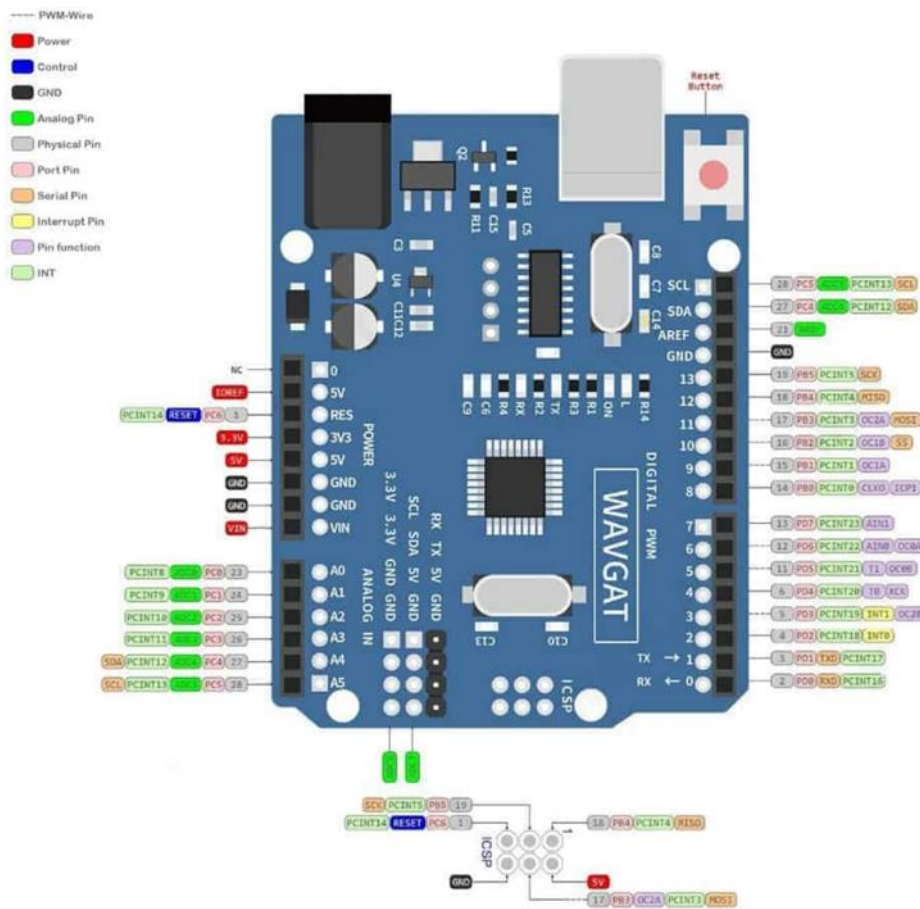


Рисунок 3.4 – Схема виходів плати Arduino Uno R3

Цифрові виходи Arduino часто використовуються для роботи із зовнішніми сенсорами та пристроями. Вони можуть бути налаштовані як для прийому, так і для передавання сигналів. За замовчуванням вони перебувають у режимі введення, приймаючи лише два значення: HIGH (1), що відповідає 5 В, або LOW (0), еквівалентне 0 В [33; 45].

Аналогові входи плати зчитують аналогові сигнали та перетворюють їх у цифрові значення завдяки вбудованому АЦП. Крім того, плата підтримує ШІМ-керування, що дає змогу імітувати аналогові сигнали за допомогою цифрових виходів [8; 33; 45].

Щоб уникнути пошкодження контактів плати Arduino під час підключення великої кількості компонентів, використовують безпайкові макетні плати, які забезпечують зручність при створенні схем та тестуванні проєктів (рис. 3.5).

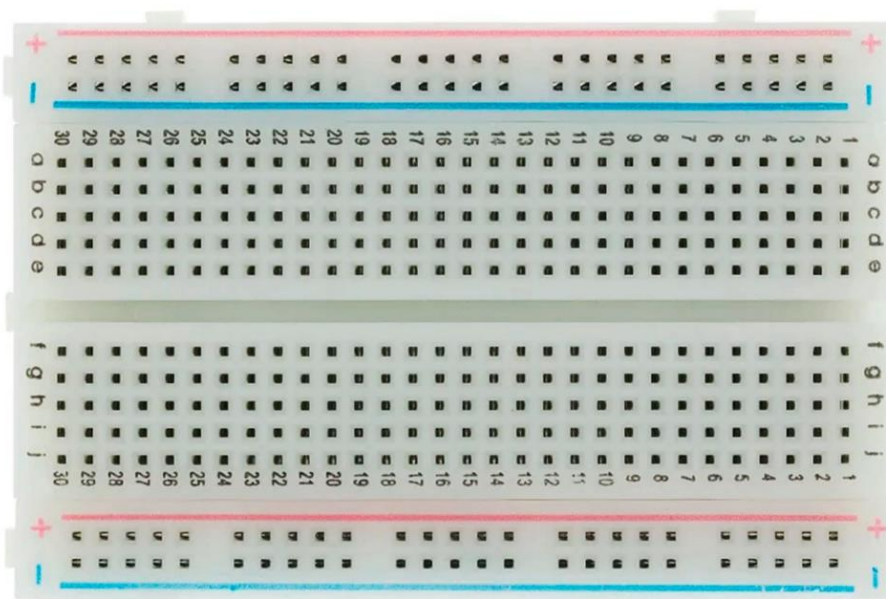


Рисунок 3.5 – Приклад безпайкової макетної плати

Для програмування пристроїв на платформі Arduino використовується середовище розробки Arduino IDE (рис. 3.6). Це безкоштовне програмне забезпечення, що дозволяє писати, компілювати та завантажувати код у контролер. Мова програмування базується на C/C++ і може бути розширена за допомогою додаткових бібліотек, що спрощує розробку складних алгоритмів [1; 33; 45].

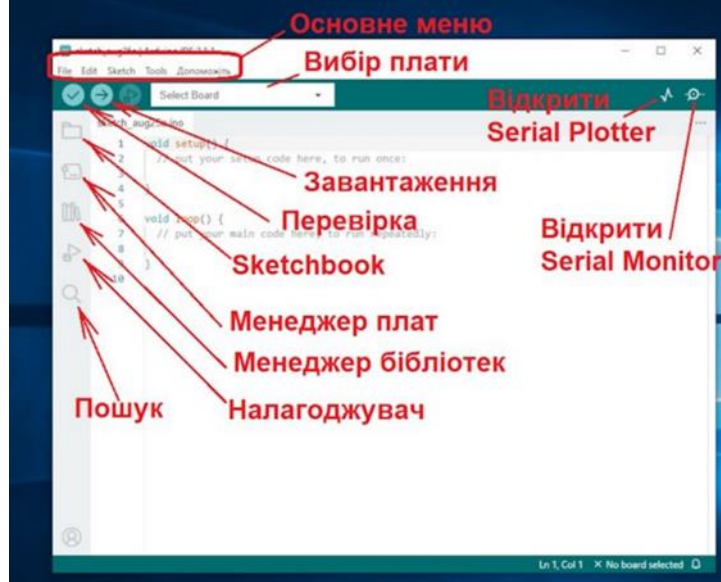


Рисунок 3.6 – Програмне середовище Arduino IDE

Головне вікно Arduino IDE поділене на кілька зон. У верхній частині розташоване меню з основними командами для роботи з файлами. Нижче знаходяться кнопки швидкого доступу до функцій компіляції, завантаження коду та створення нового проєкту. Центральна частина призначена для написання програмного коду, а в нижній частині відображається інформація про компіляцію, можливі помилки та статус підключеного пристрою [33; 45].

Далі розглянемо використання основних сенсорів у проєкті.

Для забезпечення стабільного і точного контролю мікроклімату у теплиці система керування використовує набір сучасних датчиків, які відповідають за вимірювання ключових параметрів: температури та вологості повітря, рівня води у резервуарі та вологості ґрунту. Вибір конкретних сенсорів обумовлений їх точністю, стабільністю роботи, простотою інтеграції та сумісністю з платформою Arduino.

В якості основного пристрою для вимірювання температури та вологості повітря в системі використовується цифровий датчик DHT22 (також відомий як AM2302) (рис. 3.7). Цей сенсор поєднує в собі терморезистор для вимірювання температури і ємнісний сенсор вологості, що забезпечує високу точність показників та стабільність у роботі [8; 10; 35; 44].

DHT22 має широкий робочий діапазон: температура вимірюється від -40 до $+80$ °C з точністю приблизно $\pm 0,5$ °C, а вологість — від 0 до 100% з точністю до $\pm 2\%$ RH.

Для передачі даних використовується цифровий сигнал, що мінімізує вплив шумів, які часто зустрічаються у аналогових системах [8; 23; 33; 41].

Конструктивно DHT22 компактний і має простий інтерфейс підключення, що робить його зручним для інтеграції в системи автоматизованого контролю мікроклімату. Він має заводське калібрування, що знижує потребу у додатковому налаштуванні.

У нашому проєкті датчик підключено до аналогового входу плати Arduino, а показники періодично зчитуються і обробляються для прийняття управлінських рішень.



Рисунок 3.7 – Датчик вимірювання вологості DHT22

Вологість ґрунту – ще один критичний параметр для успішного вирощування, адже від неї залежить водозабезпечення кореневої системи та загальний стан рослин. У системі для вимірювання вологості ґрунту використовується аналоговий ємнісний датчик вологості (рисунок 3.8).

Принцип дії такого датчика базується на зміні ємності між двома електродами залежно від рівня вологи у ґрунті. Оскільки вода має більшу діелектричну проникність

ніж сухий ґрунт, ємність змінюється у відповідності з вологістю. Ємнісні сенсори вологості ґрунту відомі своєю стійкістю до корозії та довгим терміном служби, що робить їх особливо придатними для агротехнічних застосувань [8; 32; 34; 43].

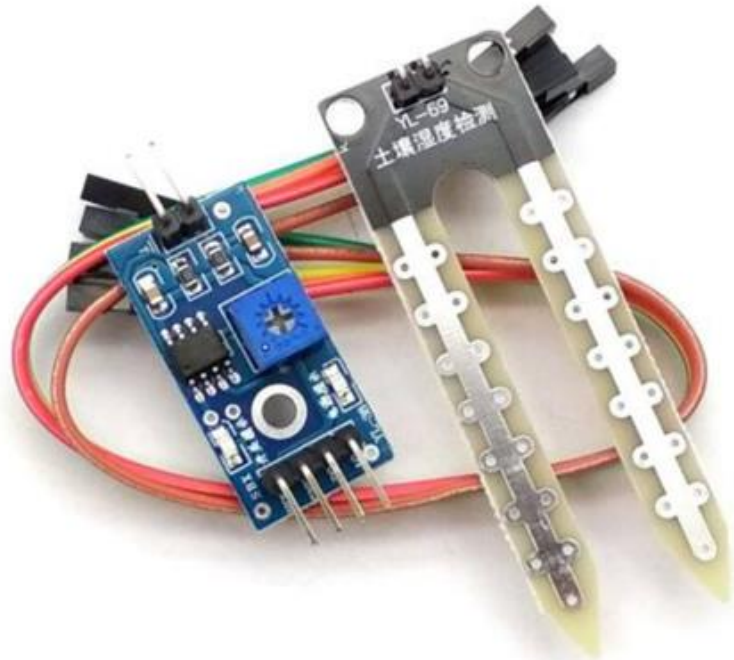


Рисунок 3.8 – Датчик вологості ґрунту для Arduino

Контроль рівня води у резервуарі є одним із ключових аспектів безперебійної роботи системи автоматичного поливу. Відповідність рівня води встановленим межам гарантує, що насос поповнюватиме резервуар вчасно, запобігаючи його висиханню, яке може призвести до пошкодження обладнання або нестачі води для рослин. Для цього застосовується ємнісний датчик рівня води, який вимірює рівень рідини без механічного контакту з рухомими частинами (рисунок 3.9).

Основними перевагами ємнісних датчиків рівня є відсутність рухомих частин, що значно підвищує надійність та знижує потребу в технічному обслуговуванні, а також стійкість до корозії та забруднень [8; 32; 34; 43].

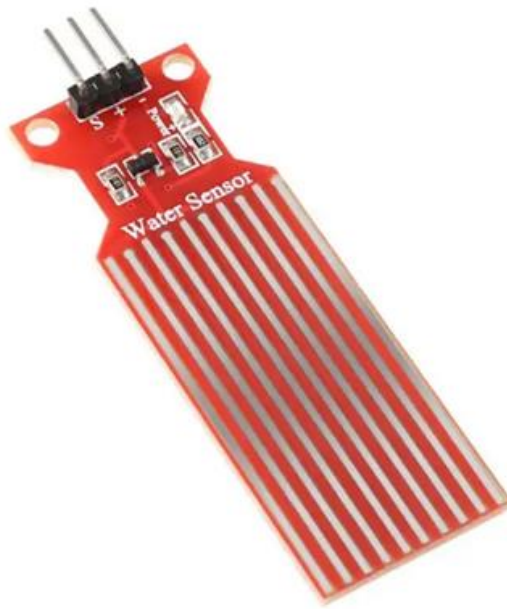


Рисунок 3.9 – Ємнісний датчик рівня для Arduino

Окрім ємнісних датчиків, існують й інші типи рівнемірів, такі як поплавкові, ультразвукові та кондуктометричні, проте для автоматизованих систем із обмеженим бюджетом і необхідністю довготривалої безперебійної роботи ємнісний датчик є найбільш оптимальним вибором. Його легка інтеграція з платформою Arduino і простота у використанні роблять його ідеальним рішенням для даного проекту.

Таким чином, об'єднання цифрового датчика DHT22 для повітряних параметрів, аналогового ємнісного датчика вологості ґрунту та ємнісного датчика рівня води в резервуарі забезпечує комплексний моніторинг ключових показників мікроклімату теплиці. Ця сукупність дозволяє системі керування автоматично підтримувати оптимальні умови для росту рослин, підвищуючи ефективність і надійність всього процесу.

3.2 Розробка структурної схеми

Система керування теплицею складається з кількох ключових компонентів, які взаємодіють для автоматичного підтримання оптимальних умов мікроклімату та забезпечення стабільного росту рослин. На структурній схемі представлені: інтерфейс користувача, контролер, датчики, виконавчі пристрої та джерело живлення.

Інтерфейс користувача виконує роль основного каналу взаємодії оператора з системою. Через нього здійснюється відображення поточних параметрів мікроклімату та налаштування режимів роботи. Інтерфейс реалізовано у вигляді локального дисплея з інтуїтивним меню, що дає можливість швидко переглядати дані та отримувати сповіщення про критичні зміни умов.

Контролер є центральною ланкою системи, яка відповідає за зчитування, обробку інформації та формування керувальних рішень. У даному проєкті застосовано платформу Arduino, що працює під управлінням спеціально розробленого програмного забезпечення. Контролер постійно приймає сигнали від датчиків, зіставляє їх із заданими порогами та керує виконавчими механізмами відповідно до визначених алгоритмів [7; 33; 45; 52].

Датчики — ключові елементи моніторингу стану теплиці. До них належать:

- цифровий датчик температури та вологості DHT22, який забезпечує точні вимірювання параметрів повітря у режимі реального часу;
- ємнісний датчик вологості ґрунту, що визначає ступінь зволоження кореневої зони та дозволяє підтримувати необхідний рівень води для рослин;
- ємнісний сенсор рівня води в резервуарі, що контролює наявність достатньої кількості рідини для роботи системи поливу.

Усі отримані показники безперервно передаються на контролер для подальшої обробки.

Виконавчі механізми відповідають за реалізацію рішень контролера щодо регулювання мікроклімату. До них входять:

- нагрівач, що забезпечує підтримання температури у холодний період або при зниженні тепла;
- охолоджувач, призначений для зниження температури при її перевищенні допустимого рівня;
- осушувач, який видаляє надлишкову вологу з повітря;
- зволожувач, що підвищує вологість до необхідних значень;

- водяний насос, який забезпечує подачу води для поливу відповідно до показань датчиків вологості ґрунту та рівня рідини в резервуарі.

Кожен із цих пристроїв приводиться в дію лише тоді, коли параметри виходять за встановлені межі, що дозволяє економно використовувати ресурси й підтримувати стабільні умови вирощування.

Джерело живлення забезпечує подачу електроенергії всім компонентам системи, підтримує їх роботу в автономному режимі та захищає обладнання від можливих перебоїв.

Функціонування системи побудоване на циклічному процесі: датчики постійно вимірюють стан середовища, контролер аналізує отримані дані, порівнює їх зі встановленими параметрами та формує команди для виконавчих приладів. В інтерфейсі користувача відображаються актуальні дані, що дозволяє контролювати роботу системи та при потребі швидко змінювати налаштування.

Структурна схема системи зображена на рисунку 3.10.

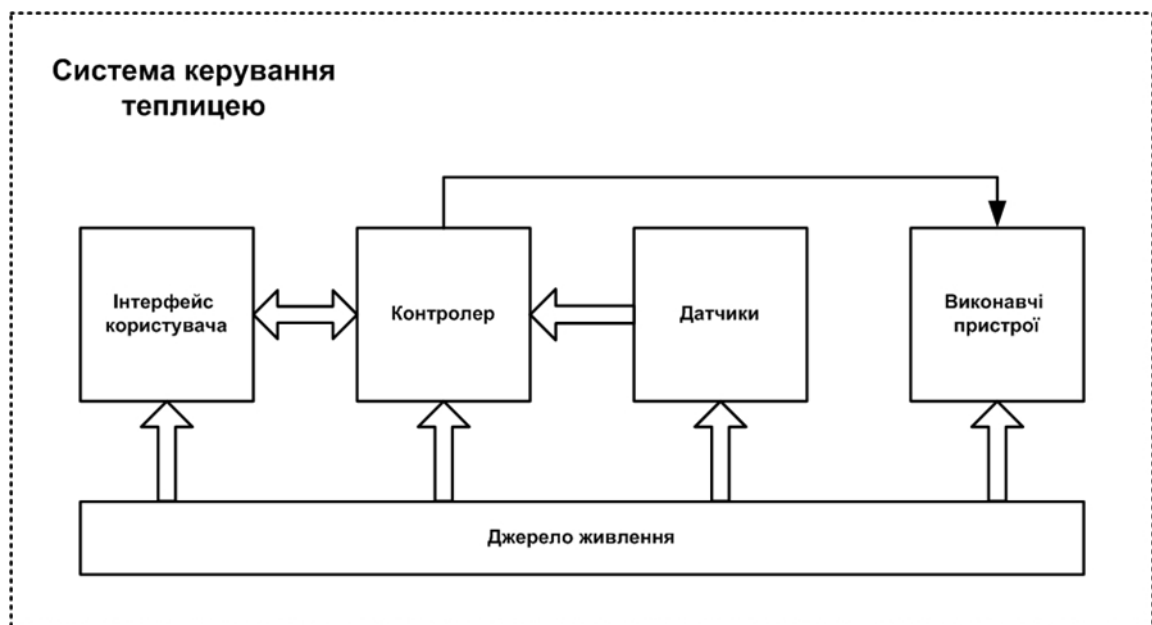


Рисунок 3.10 - Структурна схема системи

Такий підхід забезпечує високу точність підтримки оптимального мікроклімату, надійність та ефективність автоматизованого вирощування рослин у теплиці.

3.3 Розробка функціональної схеми

Система автоматичного керування теплицею складається з низки взаємопов'язаних функціональних модулів, кожен із яких виконує свою окрему роль у забезпеченні стабільного мікроклімату. Нижче наведено розгорнуту характеристику кожного модуля, відповідно до поданої структурної схеми.

Інтерфейс користувача є головним каналом зв'язку оператора з системою. Він включає дисплей, на якому відображаються актуальні дані щодо стану теплиці: температура повітря, рівень вологості, кількість води в резервуарі та інші ключові показники. Крім того, інтерфейс обладнаний системою сповіщень, що інформує оператора про критичні зміни або можливі неполадки. Такий функціонал забезпечує моніторинг у режимі реального часу та дозволяє швидко реагувати на будь-які відхилення.

Контролер виконує функцію центрального обчислювального блоку та складається з апаратної частини (плати Arduino) і програмного забезпечення. Він обробляє дані, що надходять від датчиків, аналізує їх відповідно до закладених алгоритмів і приймає рішення щодо активації певних виконавчих елементів. Також контролер сприймає команди від оператора, які надходять через інтерфейс користувача, та вносить відповідні зміни у параметри роботи системи.

Датчики забезпечують безперервне відстеження умов у теплиці. У складі системи використовуються такі сенсорні елементи:

- датчик температури повітря, який контролює тепловий режим середовища і допомагає підтримувати його в межах норми;
- датчик рівня води, що стежить за кількістю рідини в резервуарі та дозволяє керувати процесом поповнення запасу води;
- датчик вологості повітря, який визначає рівень вологовмісту та впливає на загальний стан рослин;
- сенсор вологості ґрунту, що контролює зволоження субстрату, забезпечуючи необхідні умови для кореневої системи.

Виконавчі механізми реалізують дії, спрямовані на підтримання оптимального клімату. До їхнього складу входять:

- нагрівач, який підвищує температуру, якщо вона опускається нижче заданого мінімуму;
- охолоджувач, що знижує температуру при її надмірному зростанні;
- насос поповнення резервуара, який автоматично додає воду при зменшенні її рівня;
- клапан системи поливу, що регулює подачу рідини до рослин;
- осушувач, який зменшує вологість повітря при її перевищенні;
- зволожувач, що додає вологу в атмосферу теплиці при її нестачі;
- звуковий сигналізатор, який інформує про аварійні ситуації, такі як критично низький рівень води або помилки у функціонуванні системи.

Джерело живлення забезпечує стабільну електроподачу всіх елементів системи, підтримуючи їхню роботу навіть за умов нестабільної зовнішньої мережі та запобігаючи збоям у роботі обладнання.

Принцип роботи системи ґрунтується на циклічному отриманні даних від датчиків, їх опрацюванні контролером та керуванні виконавчими пристроями для підтримання необхідних параметрів мікроклімату. Дані про поточний стан відображаються на дисплеї в реальному часі, а при виникненні критичних ситуацій активується звукове оповіщення. Такий інтегрований підхід дозволяє повністю автоматизувати процес керування теплицею, підвищити ефективність вирощування культур і значно зменшити потребу у ручному нагляді.

Функціональна схема розробленої системи зображена на рис. 3.11.

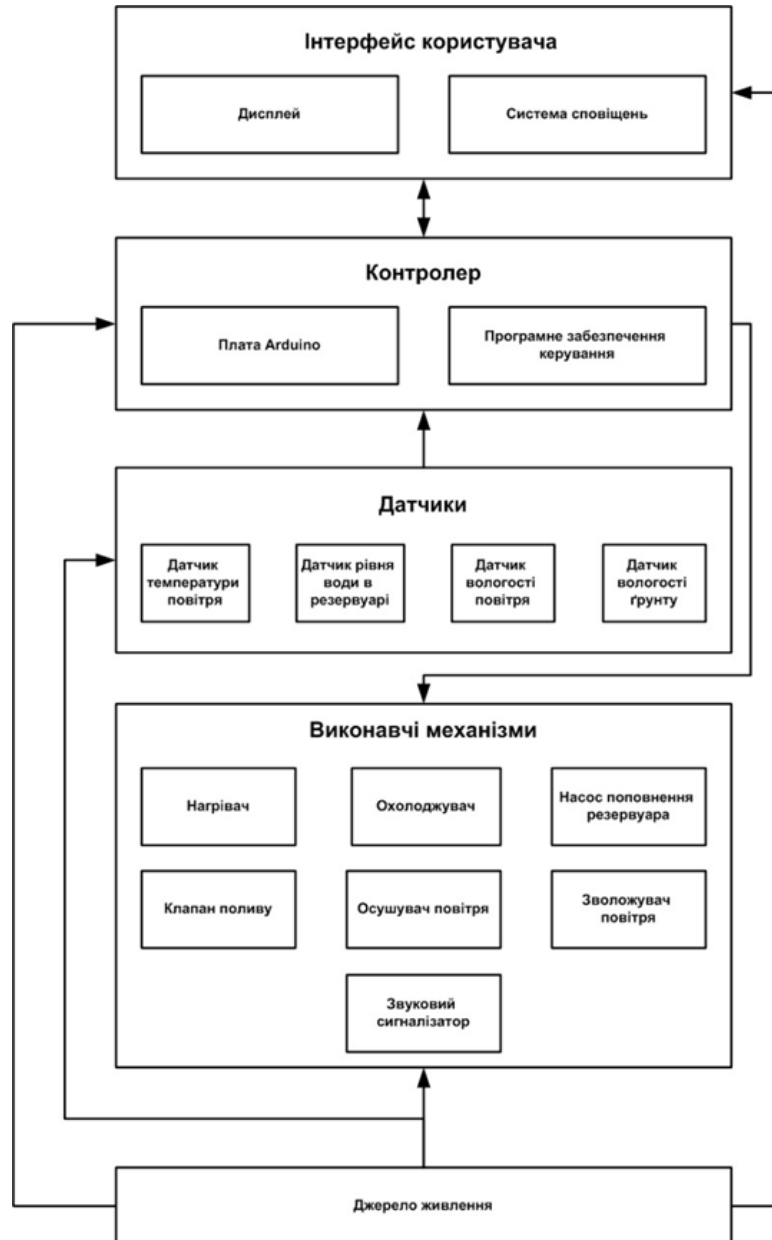


Рисунок 3.11 – Функціональна схема системи

Отже, після детального аналізу функціональних можливостей, а також розгляду його структурної та функціональної схем, можна перейти до опису блок-схем головної програми та допоміжних підпрограм, які забезпечують реалізацію ПЗ.

4 РОЗРОБКА БЛОК-СХЕМ ТА АЛГОРИТМІВ ФУНКЦІОНУВАННЯ СИСТЕМИ

4.1 Блок-схеми та опис алгоритмів функціонування автоматизованої системи керування теплицею

Загальна блок-схема системи керування теплицею демонструє основний послідовний алгоритм роботи системи.

Процес починається з ініціалізації системи, під час якої готуються всі необхідні компоненти для подальшої роботи. Наступним кроком відбувається налаштування сенсорів та виконавчих пристроїв відповідно до заданих параметрів.

Після цього встановлюються початкові параметри, які визначають межі допустимих значень для подальшого моніторингу.

Далі система переходить до циклу зчитування даних з датчиків, що є основою для подальшого прийняття рішень.

Після перевірки працездатності системи визначається режим роботи: автоматичний чи ручний. Від вибору режиму залежить подальший сценарій керування.

Далі відбувається постійна відправка даних на інтерфейс користувача, що забезпечує відображення актуальної інформації про стан теплиці.

Для стабілізації системи і уникнення надмірного навантаження між циклами перевірки встановлена затримка у 1 секунду.

Процес має циклічний характер і завершується лише у разі вимкнення системи.

Блок-схему алгоритму системи зображено на рисунку 4.1.

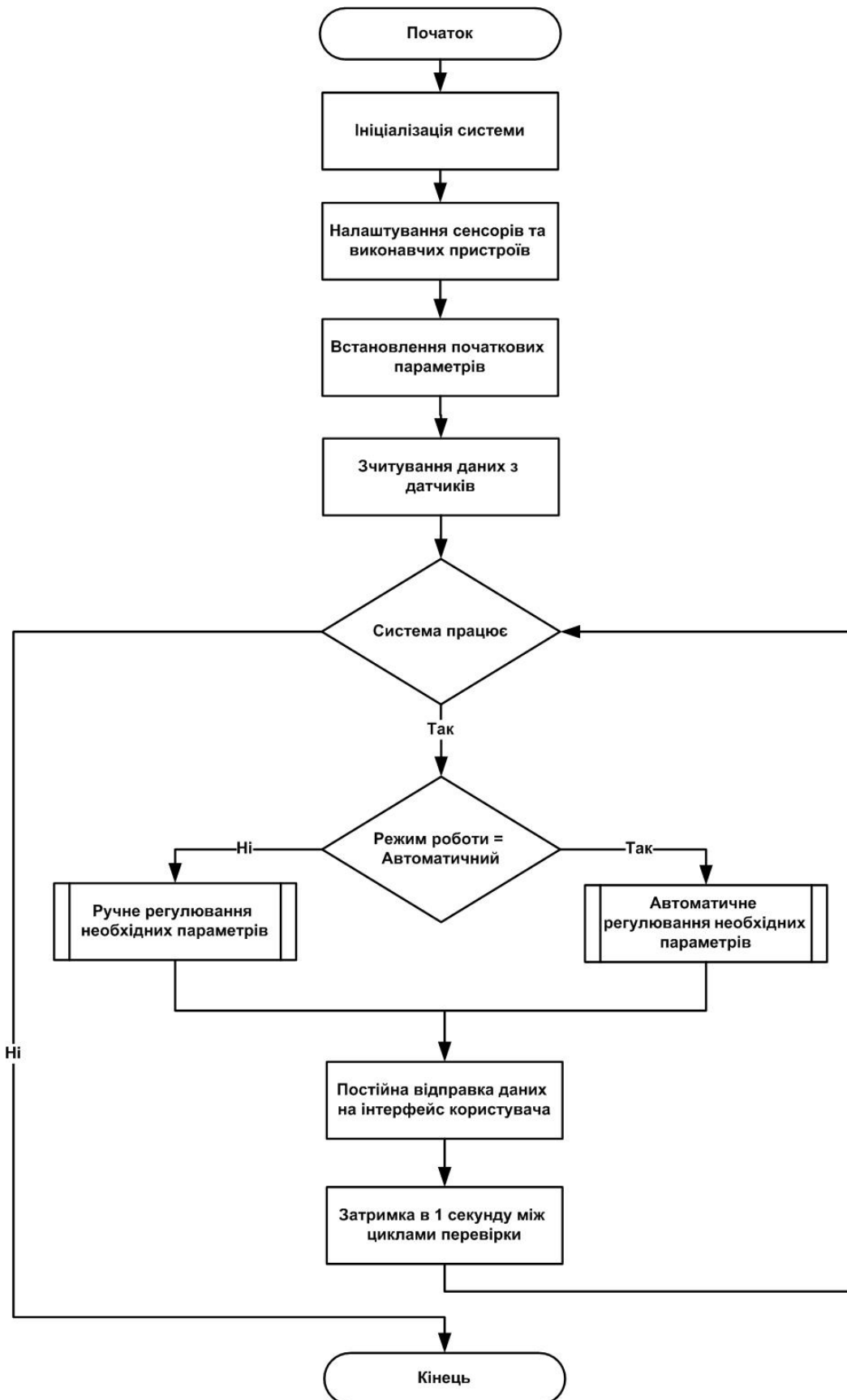


Рисунок 4.1 - Блок-схема алгоритму роботи системи

Після запуску мікроконтролера Arduino система виконує функцію `setup()`,

яка відповідає за повну початкову ініціалізацію. На цьому етапі налаштовується послідовний порт зв'язку (`Serial.begin(9600)`), ініціалізується об'єкт датчика температури та вологості повітря DHT, встановлюються режими роботи для всіх цифрових пінів, а також активується світлодіод, який інформує про активність режиму (режимна індикація).

Для покращення читабельності та зручності обслуговування коду всі піни мають власні імена, присвоєні за допомогою `const int`. Це дозволяє швидко адаптувати систему до змін апаратного забезпечення, змінюючи лише одну змінну в коді. Наприклад, аналоговий вхід A0, позначений як `DHTPIN`, використовується для підключення сенсора DHT22, що забезпечує зчитування температури повітря та вологості. Аналоговий пін A2 (`WL_potPin`) відповідає за зчитування рівня води в резервуарі, а пін A3 (`SOIL_moisturePin`) — за зчитування вологості ґрунту. Обидва сенсори в рамках симуляції імітуються за допомогою потенціометрів, що дозволяє вручну змінювати значення під час тестування.

Цифрові піни системи призначені для керування виконавчими пристроями та світлодіодною індикацією. Зокрема:

- Пін 13 (`TEMP_modeLedPin`) постійно активний і свідчить про роботу системи.
- Піни 12 та 5 (`TEMP_okLedPin`, `HUM_okLedPin`) сигналізують, що температура або вологість повітря перебувають у допустимому діапазоні.
- Піни 11 та 10 (`TEMP_heaterLedPin`, `TEMP_coolerLedPin`) керують нагрівачем і охолоджувачем відповідно.
- Пін 9 (`WL_ledOk_PIN`) вказує, що рівень води в резервуарі є нормальним.
- Пін 8 (`WL_pumpLedPin`) активує насос поповнення води.
- Пін 7 (`SOIL_ledOk_PIN`) сигналізує про нормальну вологість ґрунту.
- Пін 6 (`IRRIGATION_valveLedPin`) керує клапаном поливу.
- Піни 4 та 3 (`HUM_dehumidifierLedPin`, `HUM_humidifierLedPin`) відповідають за роботу осушувача та зволожувача повітря.

- Пін 2 (TEMP_piezoPin) активує звукову сигналізацію у разі критичних відхилень температури або рівня води.

Далі розглянемо окремо алгоритми підпрограм: ручний режим та автоматичний.

Почнемо ми з автоматичного режиму, адже він є основним в нашій системі.

У цьому режимі контролер повністю бере на себе функцію моніторингу та регулювання мікрокліматичних параметрів, орієнтуючись на значення температури повітря, вологості повітря, вологості ґрунту та рівня води в резервуарі. Процес починається з перевірки, чи активований автоматичний режим. Якщо так, система по чергово опитує всі датчики та обробляє отримані значення.

Насамперед зчитується температура та вологість повітря з сенсора DHT22, підключеного до аналогового входу А0. Зчитування здійснюється за допомогою методу readRealSensors(), де для температури використовується наступний код:

```
float t = dht.readTemperature();
if (!isnan(t)) { temp_currentTemperature = t; }
else if (millis() - lastTempErrorMsg > 10000) { // Повідомлення про помилку не частіше 10 сек
    Serial.println(F("MSG:Помилка читання температури DHT!"));
    lastTempErrorMsg = millis();
}
```

Аналогічно обробляється і вологість повітря :

```
float h = dht.readHumidity();
if (!isnan(h)) { hum_currentHumidity = h; }
else if (millis() - lastHumErrorMsg > 10000) { // Повідомлення про помилку не частіше 10 сек
    Serial.println(F("MSG:Помилка читання вологості DHT!"));
    lastHumErrorMsg = millis();
}
```

Далі зчитується рівень води в резервуарі з потенціометра, що імітує датчик на вході А2. Його значення масштабується у відсоткову шкалу:

```
int rawWL = analogRead(WL_potPin);
wl_currentWaterLevel = map(rawWL, 0, 1023, 0, 100); // Масштабування 0-1023 -> 0-100 %
```

Після цього система переходить до аналізу вологості ґрунту, яку зчитує через вхід АЗ. Оскільки аналоговий сигнал з цього датчика інтерпретується у зворотному масштабі (високий рівень сигналу — сухий ґрунт), виконується така обробка:

```
int rawSoil = analogRead(SOIL_moisturePin);
// Приклад масштабування: припускаємо, що 0В (0) = 100%, 5В (1023) = 0%
soil_currentMoisture = map(rawSoil, 0, 1023, 100, 0);
soil_currentMoisture = constrain(soil_currentMoisture, 0.0, 100.0); //
Обмежуємо 0-100%
```

Після збору всіх сенсорних даних запускається логіка автоматичного регулювання. Спочатку система порівнює температуру повітря з установленими межами. Якщо температура нижча за нижню межу, активується нагрівач, і виводиться повідомлення в консоль:

```
if (!temp_isHeating && temp_currentTemperature < temp_lowLimit_User) {
    temp_isHeating = true; // Вмикаємо, якщо було ВИМКНЕНО і стало ХОЛОДНО
    Serial.println(F("MSG:Температура нижче норми, вмикається нагрівач."));
} else if (temp_isHeating && temp_currentTemperature >= temp_target_User) {
    temp_isHeating = false; // Вимикаємо, якщо було УВИМКНЕНО і досягли
ЦІЛЬОВОЇ
    Serial.println(F("MSG:Цільова температура досягнута, вимикається
нагрівач."));
}
```

Аналогічно вмикається охолоджувач при перевищенні верхнього порогу:

```
if (!temp_isCooling && temp_currentTemperature > temp_highLimit_User) {
    temp_isCooling = true; // Вмикаємо, якщо було ВИМКНЕНО і стало ЖАРКО
    Serial.println(F("MSG:Температура вище норми, вмикається охолодження."));
} else if (temp_isCooling && temp_currentTemperature <= temp_target_User) {
    temp_isCooling = false; // Вимикаємо, якщо було УВИМКНЕНО і досягли
ЦІЛЬОВОЇ
    Serial.println(F("MSG:Цільова температура досягнута, вимикається
охолодження."));
}
}
```

Також передбачено конфліктне відключення одного з пристроїв, якщо обидва увімкнені одночасно:

```
// --- Запобігання одночасній роботі ---
if (temp_isHeating && temp_isCooling) {
    temp_isCooling = false; // Пріоритет нагріву
    if (temp_wasCooling) { // Повідомляємо, тільки якщо стан змінився
        Serial.println(F("MSG:КОНФЛІКТ: Нагрів активний, охолодження примусово
вимкнено."));
        temp_wasCooling = false;
    }
}
```

На наступному етапі оцінюється рівень води в резервуарі. Якщо значення опускається нижче встановленого порогу, активується насос:

```
if (!wl_isPumpOn && wl_currentWaterLevel < wl_lowLimit_User) {
    wl_isPumpOn = true;
    Serial.println(F("MSG:Низький рівень води в резервуарі, вмикається
насос."));
} else if (wl_isPumpOn && wl_currentWaterLevel >= wl_target_User) {
    wl_isPumpOn = false;
    Serial.println(F("MSG:Цільовий рівень води досягнуто, вимикається
насос."));
}
```

Далі контролер оцінює вологість ґрунту. Якщо показник менший за мінімальний, подається команда на відкриття клапана поливу:

```
if (!irrigation_isValveOn && soil_currentMoisture < soil_lowLimit_User) {
    irrigation_isValveOn = true;
    Serial.println(F("MSG:Ґрунт сухий, вмикається полив."));
} else if (irrigation_isValveOn && soil_currentMoisture >= soil_target_User)
{
    irrigation_isValveOn = false;
    Serial.println(F("MSG:Цільова вологість ґрунту досягнута, вимикається
полив."));
}
```

Після цього здійснюється обробка вологості повітря. Якщо показник нижчий за норму — активується зволожувач:

```
if (!hum_isHumidifierOn && hum_currentHumidity < hum_lowLimit_User) {
    hum_isHumidifierOn = true;
    Serial.println(F("MSG:Низька вологість повітря, вмикається зволожувач."));
} else if (hum_isHumidifierOn && hum_currentHumidity >= hum_target_User) {
    hum_isHumidifierOn = false;
    Serial.println(F("MSG:Цільова вологість повітря досягнута, вимикається
зволожувач."));
}
```

У разі перевищення верхнього порогу вмикається осушувач:

```
if (!hum_isDehumidifierOn && hum_currentHumidity > hum_highLimit_User) {
    hum_isDehumidifierOn = true;
    Serial.println(F("MSG:Висока вологість повітря, вмикається осушувач."));
} else if (hum_isDehumidifierOn && hum_currentHumidity <= hum_target_User) {
    hum_isDehumidifierOn = false;
    Serial.println(F("MSG:Цільова вологість повітря досягнута, вимикається
осушувач."));
}
```

Після обробки всіх параметрів виконується оновлення світлодіодних індикаторів стану та передача інформації на графічний інтерфейс користувача через Serial:

```

if (currentMillis - lastGuiUpdateTime >= GUI_UPDATE_INTERVAL) {
    lastGuiUpdateTime = currentMillis;
    sendDataToGUI_Optimized();
}

```

Цикл автоматичного регулювання повторюється з фіксованою затримкою в 1 секунду між циклами зчитування. Таким чином, забезпечується постійна адаптація мікроклімату теплиці до змін умов, зводячи до мінімуму участь оператора. Алгоритм автоматичного режиму керування представлений на рисунках 4.2 та 4.3:

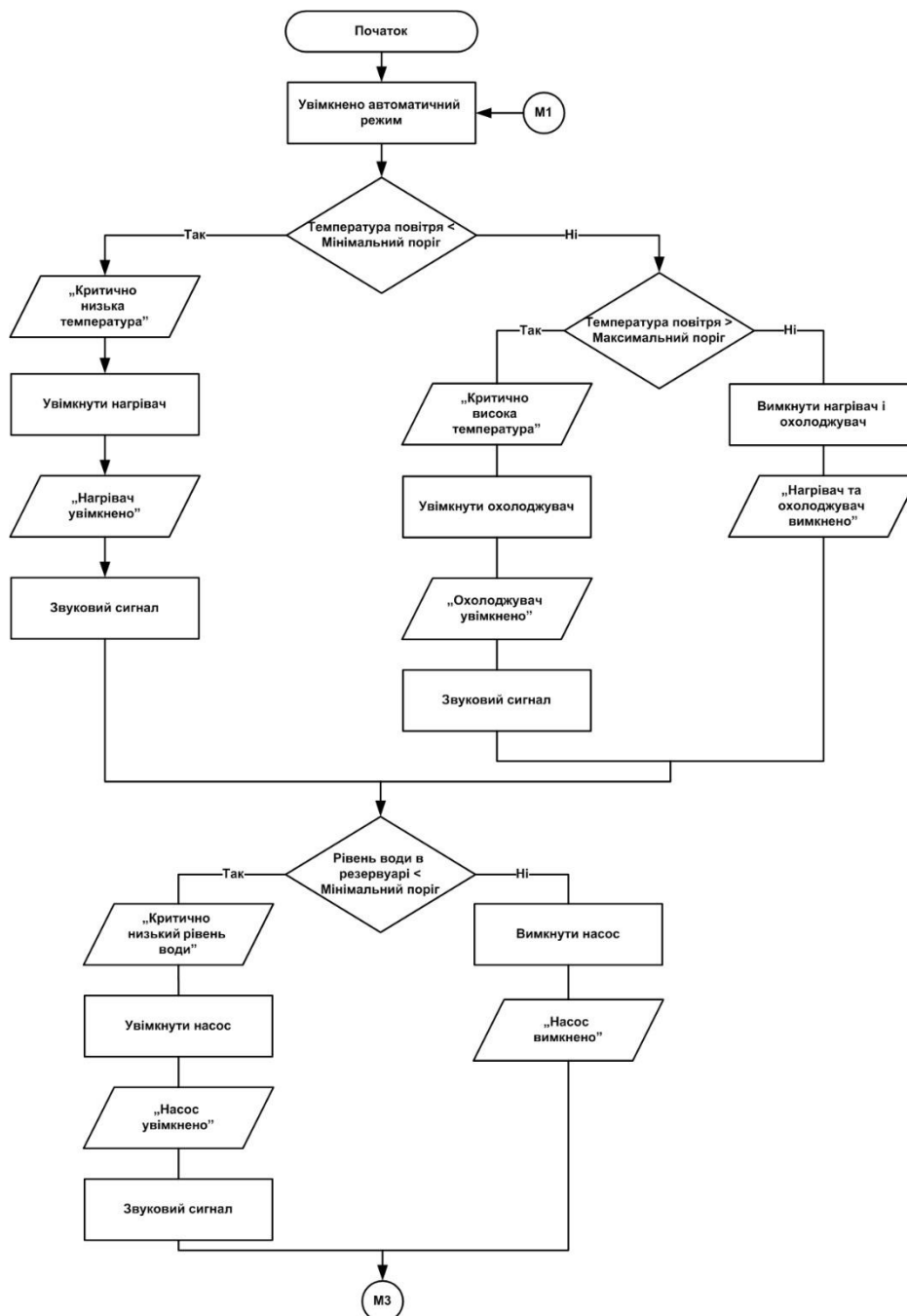


Рисунок 4.2 – Блок-схема алгоритму автоматичного режиму керування (частина 1)

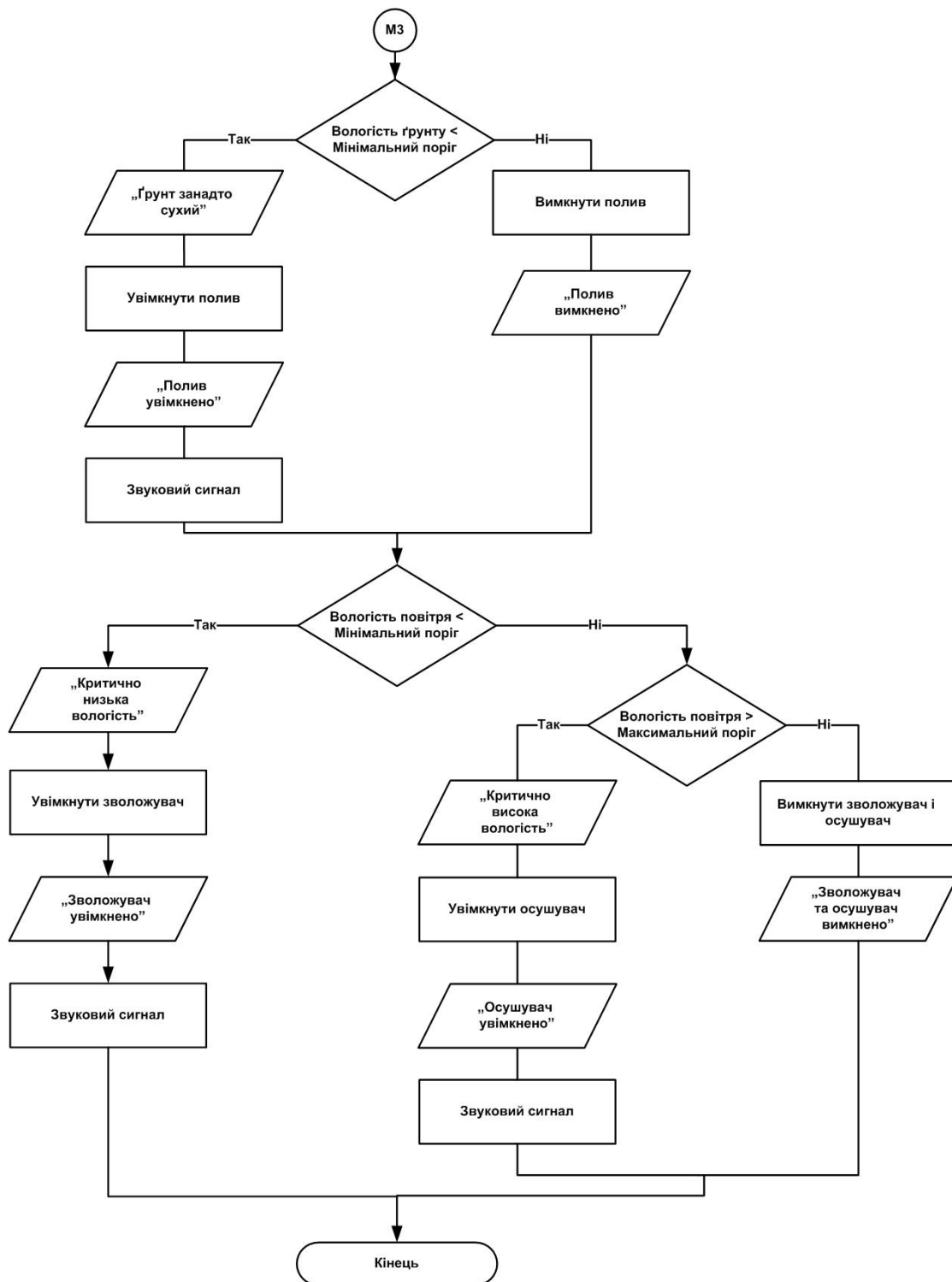


Рисунок 4.3 – Блок-схема алгоритму автоматичного режиму керування (частина 2)

Далі оглянемо алгоритм ручного режиму. Ручний режим роботи системи був задуманий як допоміжний та резервний варіант керування у випадках, коли автоматичний режим з якоїсь причини не може функціонувати коректно — наприклад, через несправність датчиків або проблеми з автоматикою. У цьому

режимі оператор має повний контроль над усіма виконавчими пристроями, з можливістю їх увімкнення чи вимкнення вручну, незалежно від поточних показників датчиків. При цьому передбачено, що після завершення ручного керування можна повернутися до автоматичного режиму для стабільної підтримки мікроклімату.

Починається робота в ручному режимі з перевірки активності відповідних прапорців, які керують станом кожного пристрою. Якщо, наприклад, насос резервуара вмикається вручну, відповідна змінна `manualMode_WP` стає `true`, а `manualState_WP` — `true`:

```
if (manualMode_WP) { wl_isPumpOn = manualState_WP; }
else {
  if (!wl_isPumpOn && wl_currentWaterLevel < wl_lowLimit_User) {
    wl_isPumpOn = true;
    Serial.println(F("MSG:Низький рівень води в резервуарі, вмикається
насос."));
  } else if (wl_isPumpOn && wl_currentWaterLevel >= wl_target_User) {
    wl_isPumpOn = false;
    Serial.println(F("MSG:Цільовий рівень води досягнуто, вимикається
насос."));
  }
}
```

Подібним чином виконується ручне керування поливом (клапаном) ґрунту:

```
if (manualMode_IR) { irrigation_isValveOn = manualState_IR; }
else {
  if (!irrigation_isValveOn && soil_currentMoisture < soil_lowLimit_User) {
    irrigation_isValveOn = true;
    Serial.println(F("MSG:Ґрунт сухий, вмикається полив."));
  } else if (irrigation_isValveOn && soil_currentMoisture >= soil_target_User)
  {
    irrigation_isValveOn = false;
    Serial.println(F("MSG:Цільова вологість ґрунту досягнута, вимикається
полив."));
  }
}
```

Для системи підтримки температури повітря в ручному режимі встановлюється керування нагрівачем і охолоджувачем за відповідними прапорцями:

```
if (manualMode_TH) { temp_isHeating = manualState_TH; } // Ручний режим
else { // Автоматичний режим
  if (!temp_isHeating && temp_currentTemperature < temp_lowLimit_User) {
    temp_isHeating = true; // Вмикаємо, якщо було ВИМКНЕНО і стало ХОЛОДНО
    Serial.println(F("MSG:Температура нижче норми, вмикається нагрівач."));
  } else if (temp_isHeating && temp_currentTemperature >= temp_target_User) {
```

```

temp_isHeating = false; // Вимикаємо, якщо було УВІМКНЕНО і досягли
ЦІЛЬОВОЇ
Serial.println(F("MSG:Цільова температура досягнута, вимикається
нагрівач."));
}
if (manualMode_TC) { temp_isCooling = manualState_TC; } // Ручний режим
else { // Автоматичний режим
if (!temp_isCooling && temp_currentTemperature > temp_highLimit_User) {
temp_isCooling = true; // Вмикаємо, якщо було ВІМКНЕНО і стало ЖАРКО
Serial.println(F("MSG:Температура вище норми, вмикається охолодження."));
} else if (temp_isCooling && temp_currentTemperature <= temp_target_User) {
temp_isCooling = false; // Вимикаємо, якщо було УВІМКНЕНО і досягли
ЦІЛЬОВОЇ
Serial.println(F("MSG:Цільова температура досягнута, вимикається
охолодження."));
}
}

```

Так само здійснюється керування зволожувачем і осушувачем повітря:

```

if (manualMode_HP) { hum_isHumidifierOn = manualState_HP; }
else {
if (!hum_isHumidifierOn && hum_currentHumidity < hum_lowLimit_User) {
hum_isHumidifierOn = true;
Serial.println(F("MSG:Низька вологість повітря, вмикається зволожувач."));
} else if (hum_isHumidifierOn && hum_currentHumidity >= hum_target_User) {
hum_isHumidifierOn = false;
Serial.println(F("MSG:Цільова вологість повітря досягнута, вимикається
зволожувач."));
}
}
if (manualMode_HD) { hum_isDehumidifierOn = manualState_HD; }
else {
if (!hum_isDehumidifierOn && hum_currentHumidity > hum_highLimit_User) {
hum_isDehumidifierOn = true;
Serial.println(F("MSG:Висока вологість повітря, вмикається осушувач."));
} else if (hum_isDehumidifierOn && hum_currentHumidity <= hum_target_User) {
hum_isDehumidifierOn = false;
Serial.println(F("MSG:Цільова вологість повітря досягнута, вимикається
осушувач."));
}
}

```

Після встановлення стану виконавчих пристроїв у ручному режимі, відбувається оновлення стану відповідних пінів Arduino, що забезпечує фактичне увімкнення або вимкнення реле чи світлодіодів.

Для кожного пристрою реалізована можливість повернутися з ручного керування в автоматичний режим за допомогою спеціальної команди, яка скидає прапорці ручного режиму і передає управління контролеру:

```

// Скидання всіх прапорців ручного режиму
void resetManualControl() {
manualMode_TC = false; manualMode_TH = false; manualMode_WP = false;
manualMode_IR = false; manualMode_HP = false; manualMode_HD = false;
}

```

Вся логіка ручного режиму організована у вигляді послідовності перевірок та встановлення станів для кожного пристрою окремо, що

представлено на блок-схемах (рисунок 4.4 – 4.6). На рисунках видно, що при виборі ручного керування оператор має змогу окремо вмикати чи вимикати кожен із пристроїв: насос резервуара, клапан поливу, нагрівач, охолоджувач, зволожувач і осушувач. Також у будь-який момент можна повернутися в автоматичний режим, який контролює параметри мікроклімату за встановленими порогоми.

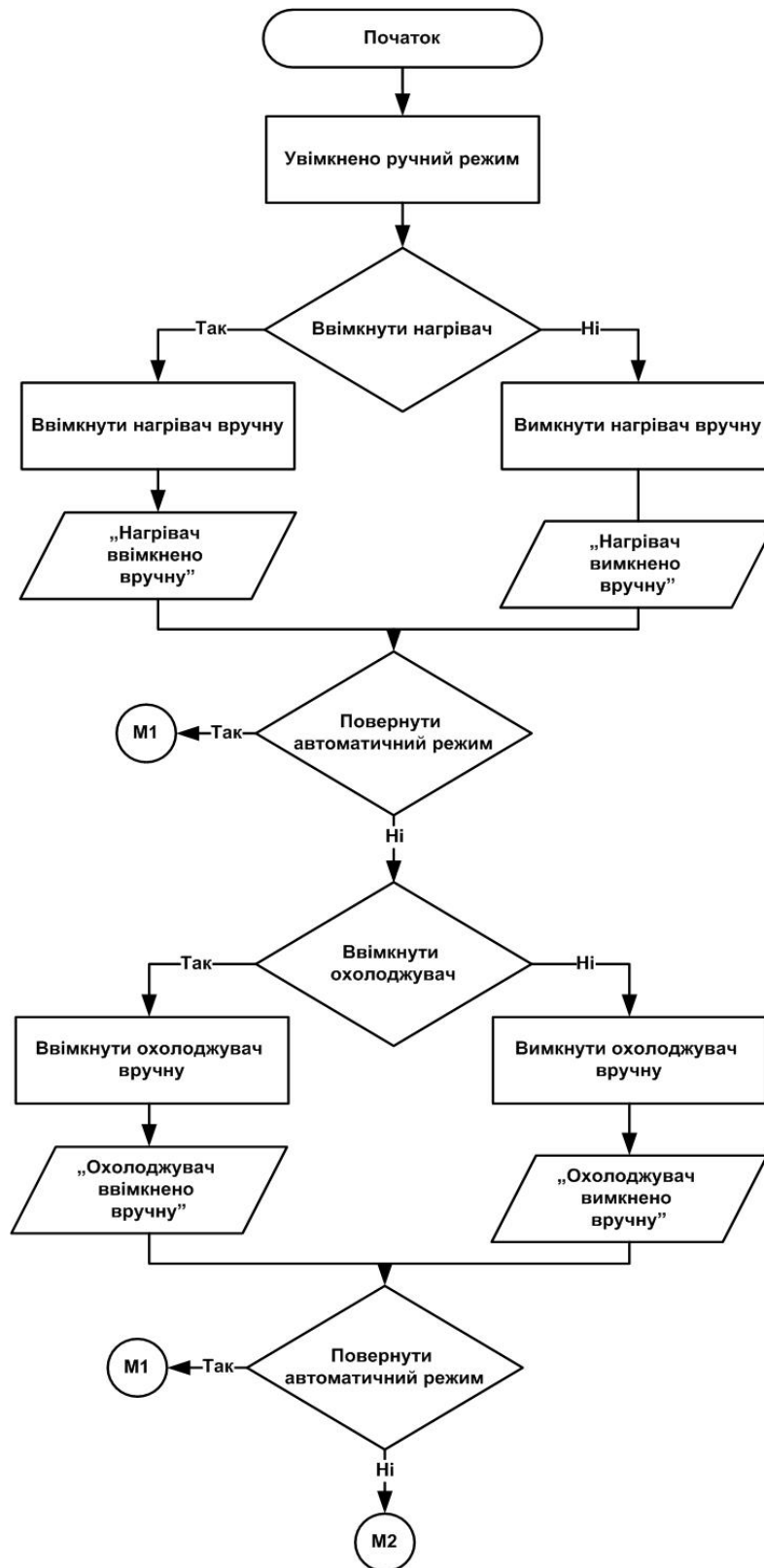


Рисунок 4.4 - Блок-схема ручного режиму керування (частина 1)

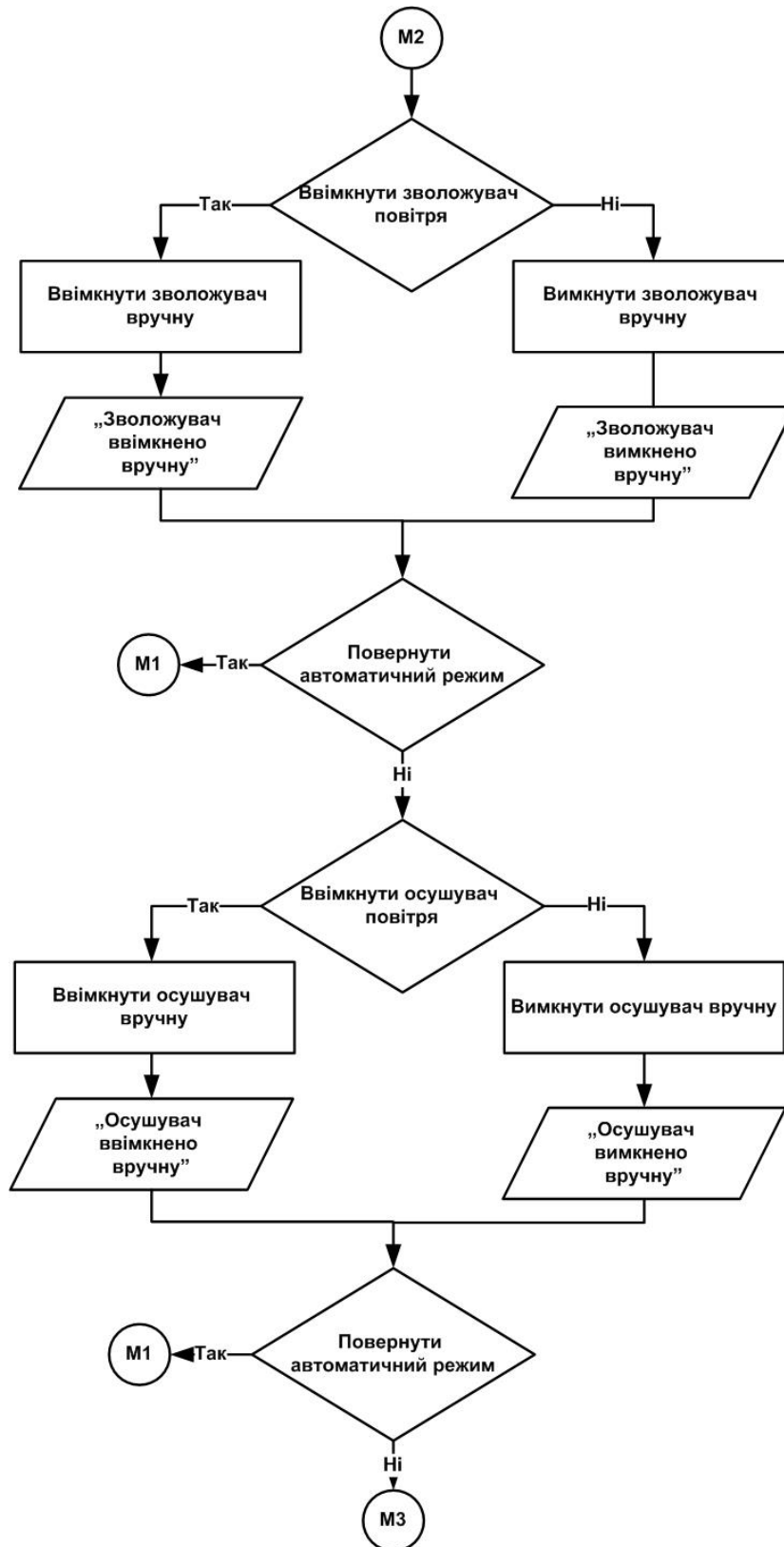


Рисунок 4.5 - Блок-схема ручного режиму керування (частина 2)

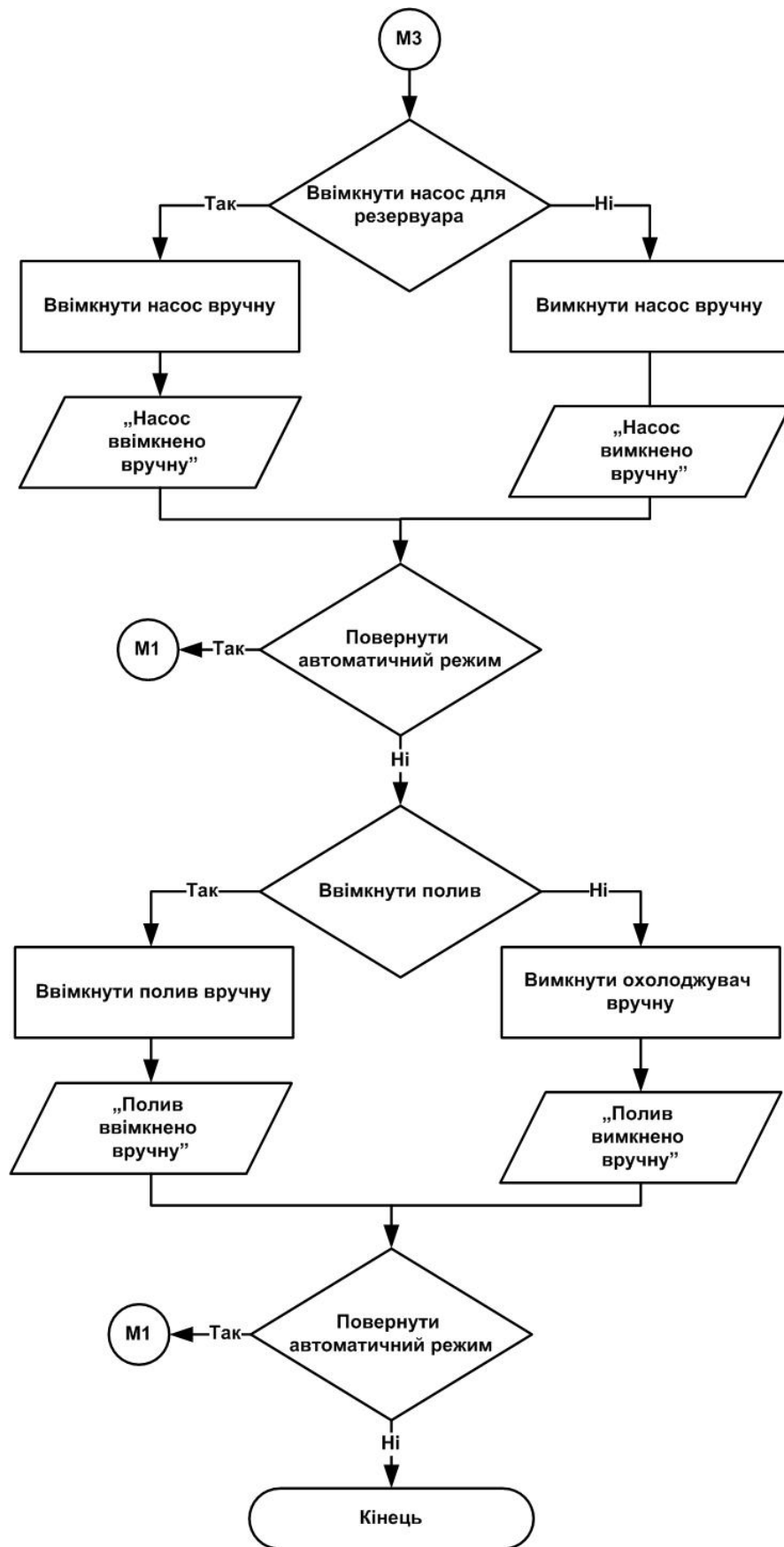


Рисунок 4.6 - Блок-схема ручного режиму керування (частина 3)

5 МЕТОДИКА ВПРОВАДЖЕННЯ СИСТЕМИ В ЕКСПЛУАТАЦІЮ

Впровадження програмного забезпечення разом з апаратною частиною системи керування теплицею передбачає комплексний підхід, що забезпечує ефективну роботу системи моніторингу та автоматичного регулювання параметрів мікроклімату. У цій роботі фізичні пристрої представлені моделями у середовищі Wokwi, що дає змогу реалізувати імітацію роботи всіх компонентів без фізичного підключення. При цьому логіка роботи, програмний код і принципи взаємодії з датчиками та виконавчими пристроями відповідають реальній системі, яку можна впровадити в реальному тепличному господарстві.

У якості центрального керуючого пристрою обрано мікроконтролер Arduino Uno — популярну, доступну і добре документовану платформу, що широко застосовується у промислових та навчальних проектах автоматизації. У середовищі Wokwi створюється його віртуальна модель, на яку підключаються датчики та індикатори.

Для програмування контролера використовується офіційна Arduino IDE, що забезпечує повну сумісність і можливість налагодження. У середовищі Wokwi налаштовується симуляція роботи Arduino з підключеними периферійними пристроями.

В системі застосовано наступні основні датчики:

- DHT22 — датчик температури та вологості повітря, підключений до аналогового входу A0. Цей датчик забезпечує якісні показники температури в діапазоні від -40 до +80 °C та вологості від 0 до 100% з точністю, достатньою для підтримки оптимального клімату.

- Потенціометри, які моделюють:
- датчик рівня води у резервуарі (вхід A2);
- датчик вологості ґрунту (вхід A3).

Застосування потенціометрів замість реальних сенсорів дозволяє на етапі моделювання вручну задавати різні значення і перевіряти реакцію системи на зміну параметрів.

Зчитування даних з цих датчиків у кодї реалізоване у вигляді функцій, що опитують кожен сенсор послідовно, забезпечуючи повний цикл моніторингу. Всі значення надходять у центральний контролер, де здійснюється їх аналіз.

Відповідно до проекту, фізично керувати насосами, вентиляторами, нагрівачами та іншими агрегатами в даній роботі неможливо, тому для демонстрації їх роботи застосовуються світлодіодні індикатори, які виконують роль візуального сигналу стану виконавчих механізмів.

Для кожного виконавчого пристрою виділено окремий LED, що горить при увімкненні відповідного режиму:

- LED насоса подачі води сигналізує про активацію поливу;
- LED нагрівача відображає увімкнення опалення;
- LED охолоджувача показує активацію вентиляції;
- LED для регулювання кислотності відображає зміни у складі живильного розчину.

Цей підхід дозволяє чітко відслідковувати роботу системи у реальному часі навіть у моделюванні, а також знижує ризики пошкодження реальних виконавчих механізмів на етапі тестування.

Для перевірки правильності роботи розробленого програмного забезпечення, а також для демонстрації функціональних можливостей системи керування мікрокліматом у теплиці, було виконано програмне моделювання з використанням середовища Wokwi. Це онлайн-емулятор платформи Arduino, який дозволяє створювати схеми, підключати віртуальні сенсори та аналізувати поведінку коду без потреби у фізичному обладнанні.

Вибір саме Wokwi був зумовлений низкою важливих переваг:

- підтримка реального синтаксису Arduino та повна сумісність з бібліотеками;
- можливість підключення декількох аналогових і цифрових пристроїв (датчики, реле, LED-індикатори тощо);
- зручна візуалізація всіх елементів схеми;

- можливість динамічного модифікування параметрів датчиків для перевірки різних станів системи;
- висока швидкість завантаження і налагодження проекту без встановлення додаткового ПЗ;
- можливість розшарювання проекту за посиланням.

На рисунку 5.1 представлено загальний вигляд зібраної віртуальної схеми системи у Wokwi, що відповідає актуальній реалізації проекту:

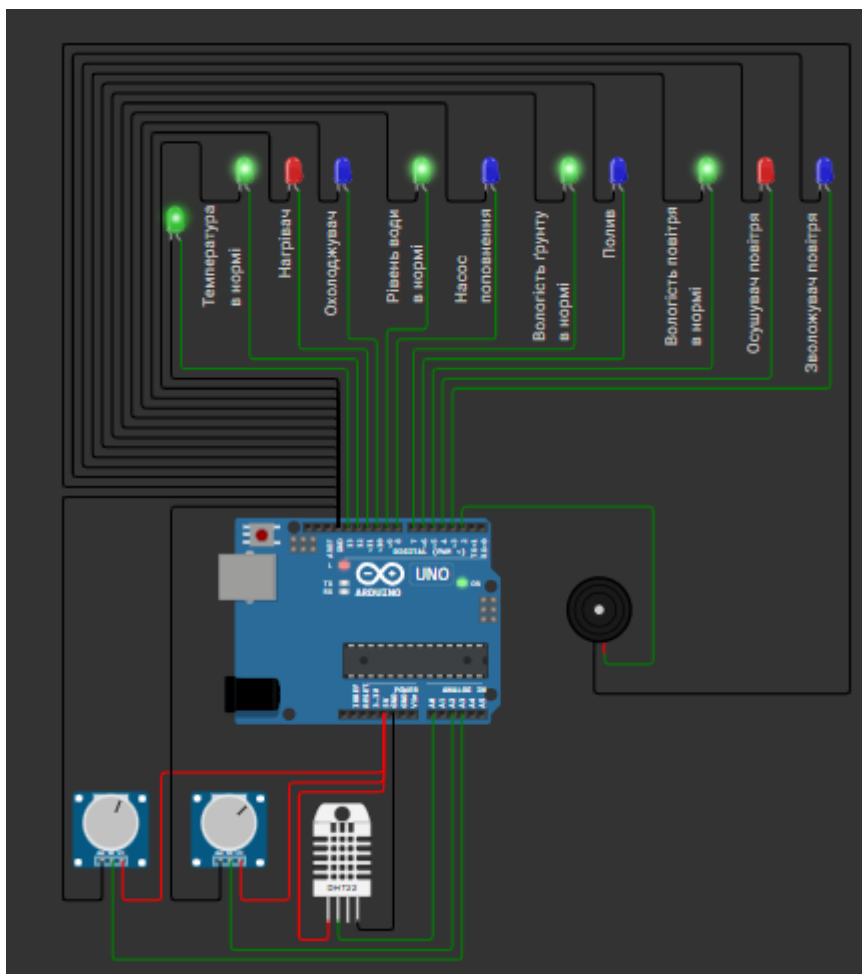


Рисунок 5.1 – Модель системи керування теплицею в стані норми, в середовищі Wokwi

Схема містить наступні ключові компоненти: мікроконтролер Arduino Uno, сенсор DHT22 (для вимірювання температури та вологості повітря), два потенціометри, що імітують датчики рівня води в резервуарі та вологості

ґрунту, а також набір світлодіодів, які відображають стан виконавчих пристроїв: охолоджувача, нагрівача, зволожувача, осушувача, насоса та клапана поливу. Для перевірки роботи автоматичного режиму симулятор дозволяє вручну змінювати значення, що подаються з датчиків. Демонстрація роботи пристроїв зображено на рисунку 5.2 – рисунку 5.8:

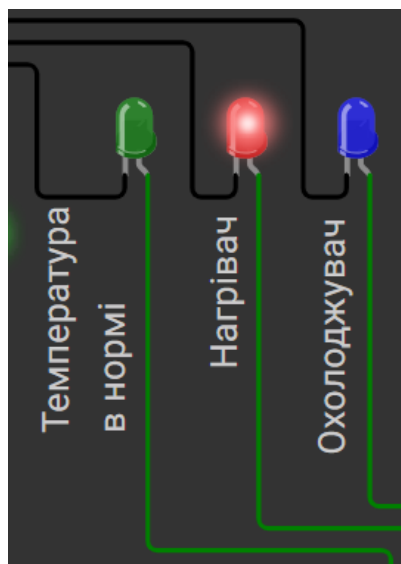


Рисунок 5.2 – Демонстрація включення нагрівача при зниженій температурі

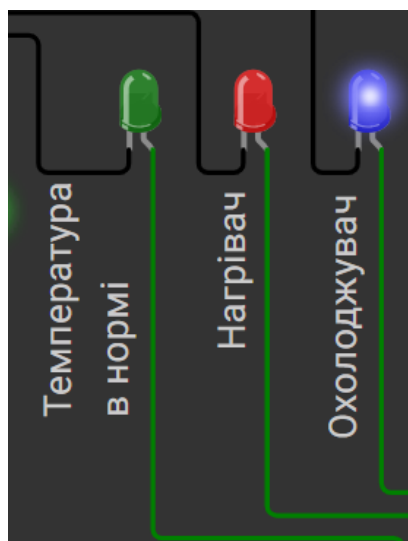


Рисунок 5.3 – Демонстрація увімкнення охолоджувача при підвищеній температурі

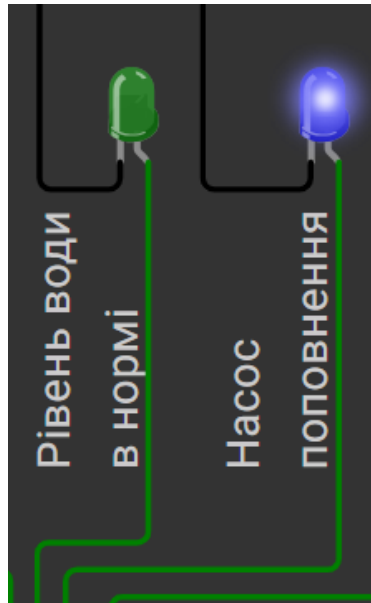


Рисунок 5.4 – Демонстрація спрацювання насоса при низькому рівні води в резервуарі



Рисунок 5.5 – Демонстрація запуску клапана поливу при сухому ґрунті

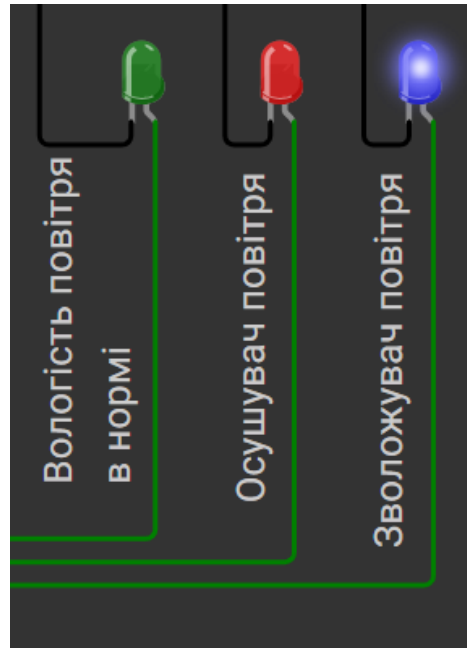


Рисунок 5.6 – Демонстрація увімкнення зволожувача при низькій вологості повітря

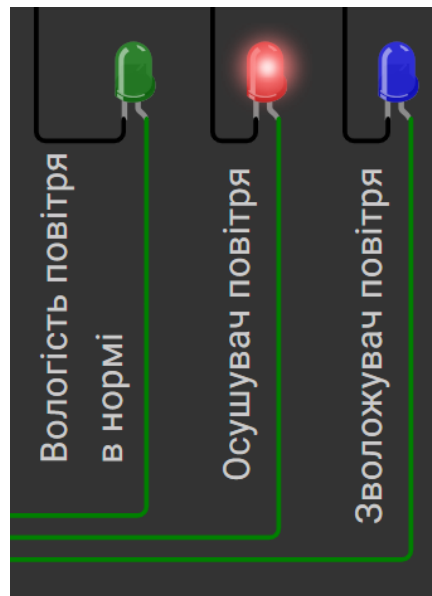


Рисунок 5.7 – Демонстрація увімкнення осушувача при високій вологості повітря

Також при досягненні будь-яким параметром критичного значення – спрацьовує звуковий сигнал (рисунок 5.8):

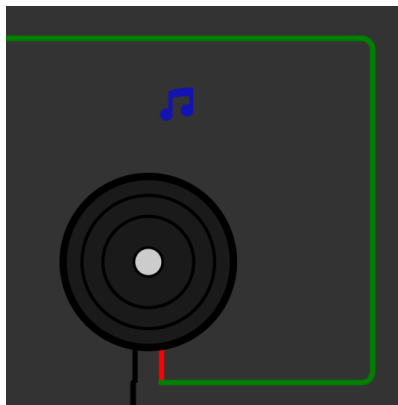


Рисунок 5.8 – Демонстрація спрацьовування звукового сигналу

Кожен з цих станів супроводжується виведенням повідомлень у Serial Monitor, а також зміною стану відповідних вихідних пінів. Це дозволяє впевнено оцінити, що логіка роботи системи реалізована коректно.

Тепер оглянемо графічний інтерфейс користувача (GUI).

Через технічні обмеження платформи Wokwi, яка використовується для моделювання апаратної частини системи керування теплицею, неможливо встановити пряме з'єднання з COM-портом комп'ютера. Це пов'язано з відсутністю у середовища Wokwi можливості емулювати фізичний послідовний порт, необхідний для обміну даними між графічним інтерфейсом користувача (GUI), написаним на Python, та апаратною частиною на базі Arduino.

Щоб забезпечити демонстрацію повноцінної роботи GUI і можливість тестування програмного забезпечення без фізичного пристрою, було розроблено спеціальний емулятор. Емулятор імітує функціонування Arduino-контролера, передає в GUI актуальні значення сенсорів та отримує команди керування виконавчими механізмами. Таким чином забезпечується реалістична симуляція роботи системи з усіма її логічними операціями, включно з автоматичним і ручним режимами керування.

Графічний інтерфейс Greenhouse Control створено для зручного моніторингу параметрів теплиці та керування виконавчими пристроями, такими як охолодження, нагрівач, насос, клапан поливу, зволожувач та осушувач. Інтерфейс реалізований з урахуванням двох режимів роботи (рисунок 5.9):

- Перше налаштування (нова система) — користувач встановлює межі параметрів, порти підключення, та зберігає ці налаштування у конфігураційному файлі.

- Підключення до існуючої системи — автоматичне підключення до раніше збереженого порту та синхронізація меж і станів.

Збереження налаштувань відбувається у JSON-файлі `greenhouse_config_target.json`, що забезпечує швидке відновлення параметрів при наступних запусках.

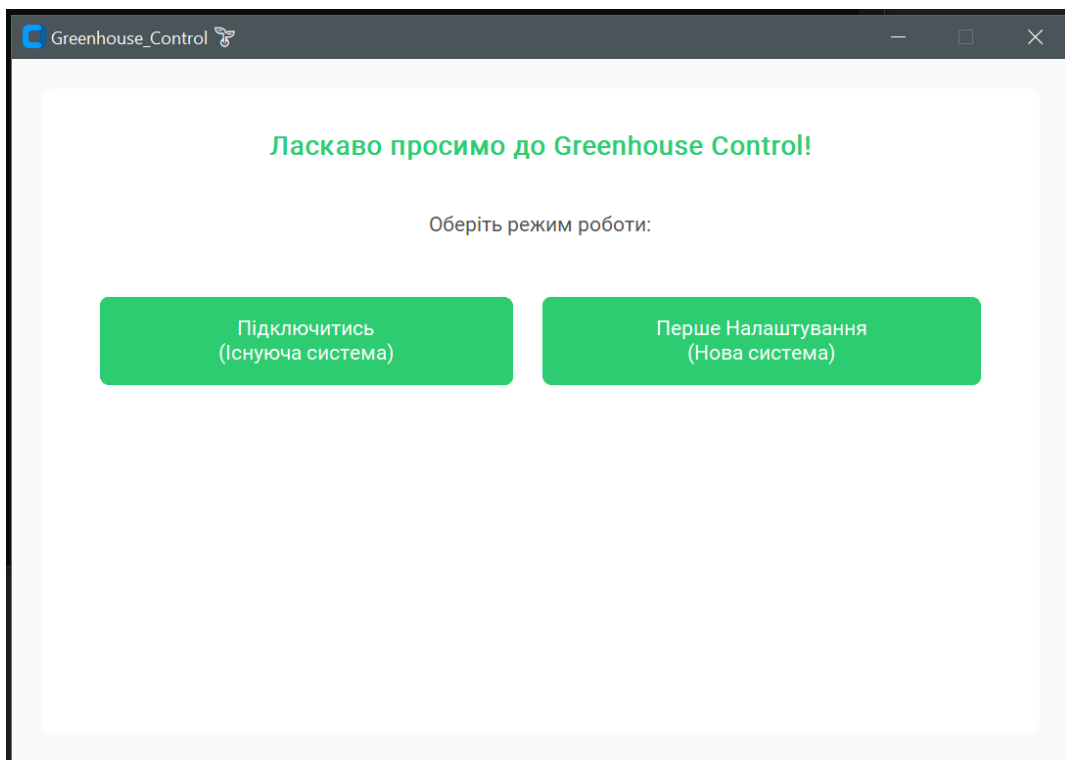


Рисунок 5.9 – Початковий екран запуску програми

Для початку роботи з Arduino нам потрібно під'єднатись до COM-порту, через панель управління зверху та кнопку «Підключити» (рисунок 5.10):

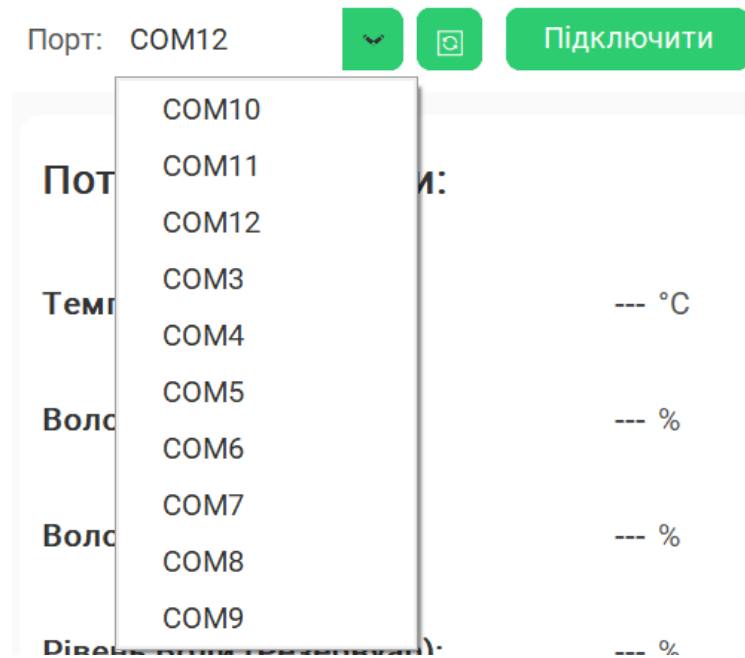


Рисунок 5.10 – Панель управління для підключення до COM-порту

Далі маємо працюючу систему, що передає поточні показники з датчиків в режимі реального часу (рис 5.11). Показники можуть підсвічуватись різним фоном в залежності від стану: норма – прозорий фон; попередження – жовтий; критичний стан – червоний.

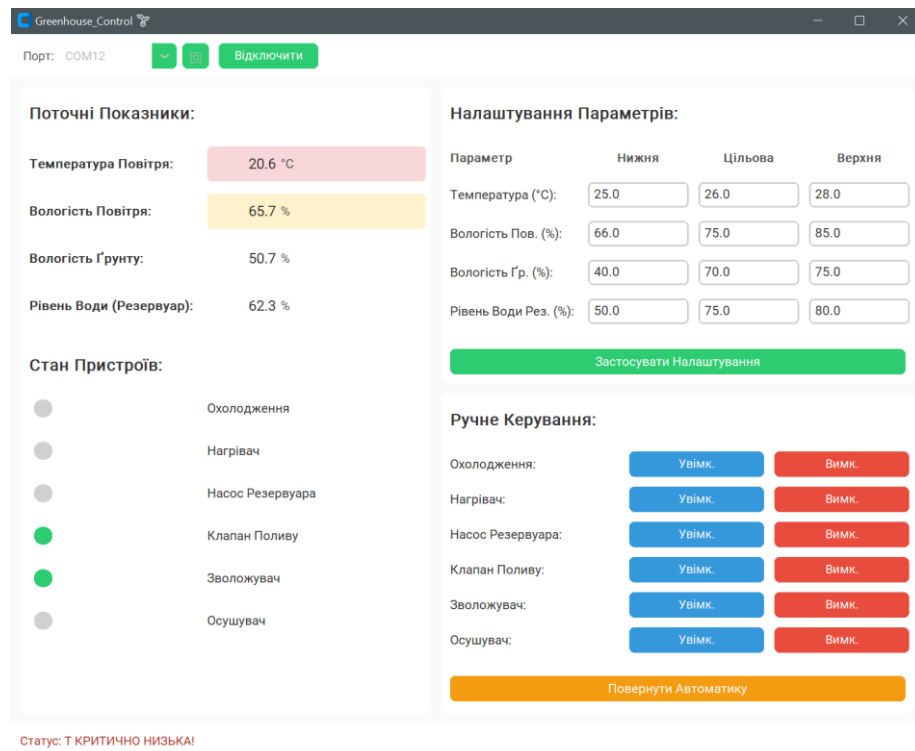


Рисунок 5.11 – Застосунок, що передає поточні показники з датчиків

Варто відзначити, що повідомлення-попередження про стан параметрів виводяться на екран в окремому поп-ап вікні (рис 5.12):

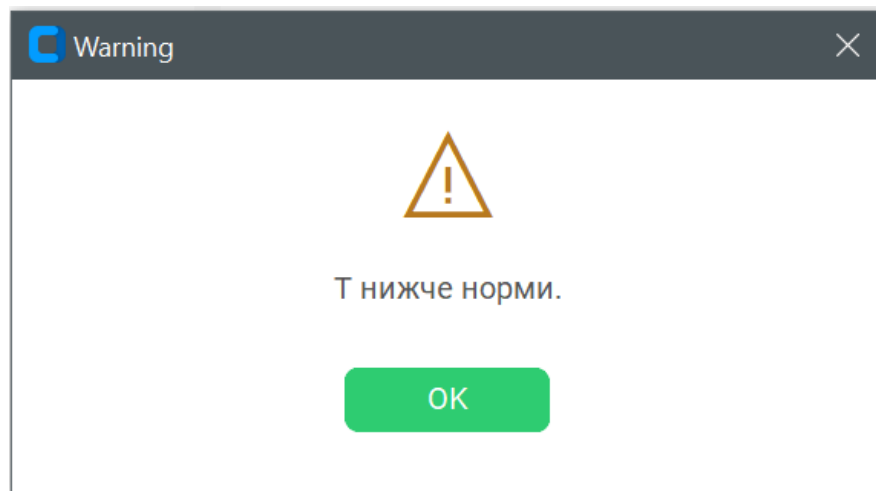


Рисунок 5.12 – Приклад виводу повідомлення про те, що температура нижче норми

Для кожного пристрою (охолодження, нагрівач, насос, клапан, зволожувач, осушувач) є світлодіодний індикатор, що змінює колір: сірий — пристрій вимкнено; зелений — пристрій увімкнено (рисунок 5.13):

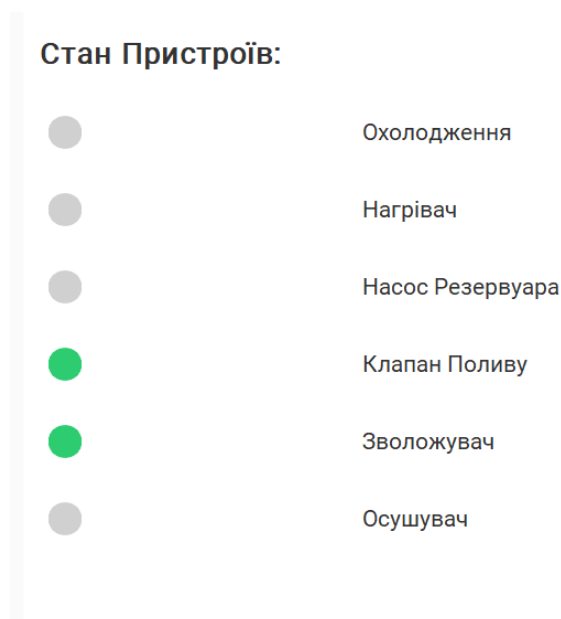


Рисунок 5.13 – Індикація роботи виконуючих пристроїв

Розроблений програмний застосунок має окрему панель для налаштування параметрів (рисунок 5.14). Містить поля для вводу нижньої, цільової та верхньої межі для кожного параметра: температура, вологість повітря, вологість ґрунту, рівень води. Після валідації (“Застосувати налаштування”) дані відправляються на контролер і зберігаються у конфігураційному файлі.

Параметр	Нижня	Цільова	Верхня
Температура (°C):	20.0	26.0	28.0
Вологість Пов. (%):	66.0	75.0	85.0
Вологість Ґр. (%):	40.0	70.0	75.0
Рівень Води Рез. (%):	50.0	75.0	80.0

Застосувати Налаштування

Рисунок 5.14 – Панель налаштування параметрів

Також було розроблено панель “Ручного керування” (рисунок 5.15), в особливості для екстрених випадків, коли треба ввімкнути або вимкнути виконавчі пристрої. Для повернення автоматичного режиму присутня кнопка – “Повернути Автоматику”.

Ручне Керування:	Увімк.	Вимк.
Охолодження:	Увімк.	Вимк.
Нагрівач:	Увімк.	Вимк.
Насос Резервуара:	Увімк.	Вимк.
Клапан Поливу:	Увімк.	Вимк.
Зволожувач:	Увімк.	Вимк.
Осушувач:	Увімк.	Вимк.

Повернути Автоматику

Рисунок 5.15 – Панель ручного керування виконавчими пристроями

В лівому нижньому кутку програмного забезпечення знаходиться панель “Статус” (рисунок 5.16), що на протязі роботи програмного застосунку транслює повідомлення про підключення, помилки, інформаційні повідомлення або підтвердження команд.

Статус: Ліміти синхронізовано з Arduino

Рисунок 5.16 – Панель “Статус”

Розроблена методика впровадження системи у промислову експлуатацію демонструє її високу адаптивність, зручність та ефективність у забезпеченні стабільного мікроклімату в теплиці.

Використання віртуального моделювання у середовищі Wokwi у поєднанні з реалістичним графічним інтерфейсом користувача дозволяє гнучко тестувати та вдосконалювати систему без необхідності фізичного обладнання. Це значно скорочує час розробки, знижує ризики помилок та відкриває широкі можливості для подальшої інтеграції і масштабування у реальних аграрних підприємствах.

ВИСНОВКИ

У ході дослідження було підтверджено актуальність впровадження автоматизованих систем контролю мікроклімату теплиць, що зумовлено потребою у підвищенні ефективності вирощування рослин та оптимізації використання ресурсів. Зростання вартості енергоносіїв, мінливість кліматичних умов та вимога забезпечення стабільної продуктивності тепличних господарств роблять автоматизацію ключовим напрямом розвитку агротехнологій.

Аналіз сучасних технічних рішень показав, що використання мікроконтролерів, датчиків та засобів бездротового зв'язку створює можливість розробки доступних, компактних та енергоефективних систем. Технології віддаленого доступу розширюють функціональні можливості таких систем, забезпечуючи оперативний моніторинг і дистанційне керування тепличним мікрокліматом.

У роботі було визначено об'єкт дослідження — процес підтримання оптимальних параметрів мікроклімату теплиці, та предмет дослідження — система автоматичного вимірювання, контролю і регулювання цих параметрів на основі мікроконтролера. Використані методи, серед яких аналіз літератури, системний підхід до вибору апаратних засобів, математична обробка даних та експериментальне тестування, дозволили створити прототип ефективної системи.

Практичні результати полягають у розробці та випробуванні комп'ютеризованої системи автоматичного регулювання мікроклімату з можливістю дистанційного доступу. Запропонована система забезпечує комплексний моніторинг тепличного середовища, оперативне реагування на зміну параметрів та підвищення ефективності технологічного процесу вирощування рослин. Розроблені технічні рішення можуть бути застосовані для модернізації тепличних комплексів, створення навчальних лабораторій та впровадження у малих фермерських господарствах.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. W3Schools. Мова програмування C++. Онлайн підручник. [Електронний ресурс]. URL: <https://w3schoolsua.github.io/cpp/index.html> (дата звернення: 06.03.2025).
2. Інститут аграрної економіки. Інтелектуальні системи управління теплицями. [Електронний ресурс]. URL: <https://iae.org.ua/research/greenhouses/> (дата звернення: 06.03.2025).
3. Український аграрний портал. Розумні теплиці та автоматизація аграрного сектору. [Електронний ресурс]. URL: <https://agroportal.ua/> (дата звернення: 06.03.2025).
4. ISO/IEC 25010:2011. Software engineering - Software product Quality Requirements and Evaluation (SQuaRE). Київ: Держстандарт України, 2011.
5. ДСТУ 8302:2015. Інформація та документація. Бібліографічне посилання. Загальні положення та правила складання. Київ: Держстандарт України, 2015.
6. ДСТУ ISO 9001:2015. Системи управління якістю. Київ: Держстандарт України, 2015.
7. Гринчук П. Основи автоматизації виробничих процесів. Київ: Політехніка, 2022. 312 с.
8. Луценко В. Сенсорні системи в теплицях: технології та застосування. Львів: Видавництво Львівської політехніки, 2021. 284 с.
9. Горбачевський І. Оптимізація керування кліматом у теплицях. Дніпро: Університет друку, 2020. 276 с.
10. Ткачук С. Автоматизовані системи моніторингу для аграрного сектору. Харків: Освіта, 2021. 320 с.
11. Бойко А. Гідропоніка та її застосування в сучасних теплицях. Одеса: Аграрна академія, 2021. 198 с.

12. Центр Інновацій АПК. Автоматизовані системи поливу та живлення рослин. [Електронний ресурс]. URL: <https://agroinnovation.com.ua/> (дата звернення: 06.03.2025).
13. Українська аграрна платформа. Новітні підходи до керування мікрокліматом у теплицях. [Електронний ресурс]. URL: <https://agro-ukraine.com.ua/> (дата звернення: 06.03.2025).
14. Платформа SmartAgro. Впровадження IoT у сучасне сільське господарство. [Електронний ресурс]. URL: <https://smartagro.com.ua/> (дата звернення: 06.03.2025).
15. АгроНаука. Використання біосенсорів у сільському господарстві. [Електронний ресурс]. URL: <https://agrosience.com.ua/> (дата звернення: 06.03.2025).
16. Державний стандарт України. ДСТУ 4113-2001. Технології автоматизації у тепличному виробництві. Київ: Держстандарт України, 2001.
17. Національний технічний університет. Практичний посібник з автоматизації агросектору. Київ: НТУ, 2022. 350 с.
18. Гідропоніка в Україні. Сучасні системи живлення рослин. [Електронний ресурс]. URL: <https://hydroponic-ua.com/> (дата звернення: 06.03.2025).
19. Цифрове землеробство. Автоматизація процесів у тепличному секторі. [Електронний ресурс]. URL: <https://digitalfarming.com.ua/> (дата звернення: 06.03.2025).
20. Головний аграрний портал України. Використання сенсорних систем у теплицях. [Електронний ресурс]. URL: <https://agroleader.com.ua/> (дата звернення: 06.03.2025).
21. Журнал "АгроТехніка". Новітні технології автоматизації у сільському господарстві. [Електронний ресурс]. URL: <https://agrotechjournal.com/> (дата звернення: 06.03.2025).
22. Інститут Біотехнологій. Інтелектуальні системи для керування теплицями. Київ: ІнБіо, 2022. 278 с.

23. Луговий М. Дистанційне керування агропроцесами: IoT у тепличному господарстві. Одеса: Аграрний Університет, 2021. 295 с.
24. Галузевий стандарт України. Автоматизація систем клімат-контролю в теплицях. Київ: Держагросандарт, 2020.
25. Arduino.ua. Датчик вологості ґрунту (гігрометр). [Електронний ресурс]. URL: <https://arduino.ua/prod521-datchik-vlajnosti-pochvi-gigrometr> (дата звернення: 15.05.2025).
26. Макаренко В. Програмування Arduino для агротехніки. Київ: Видавництво “Техніка”, 2023. 256 с.
27. Коваленко С., Петренко І. Сенсорні системи для моніторингу стану ґрунту // Агронаука. 2022. №3. С. 45-59.
28. Ткачук А. Інтелектуальні системи управління тепличними комплексами. Харків: Освіта, 2023. 300 с.
29. Dmytrenko V. Системи автоматичного поливу для теплиць. Львів: ЛНУ, 2021. 210 с.
30. Власенко Ю. Використання бездротових датчиків у сільському господарстві // Інновації АПК. 2023. №5. С. 78-92.
31. Іванова Н. Методи оптимізації клімат-контролю в теплицях. Київ: НУХТ, 2022. 190 с.
32. Gupta R. Automation in Agriculture: Applications and Challenges // International Journal of Agritech. 2023. Vol. 15, Issue 1. Pp. 34-48.
33. 43. AgriTech Today. Sensors for Precision Agriculture. [Електронний ресурс]. URL: <https://agritechtoday.com/sensors-for-precision-agriculture/> (дата звернення: 15.05.2025).
34. Петров О. Програмування контролерів Arduino для аграрних застосувань. Харків: Техно-Наука, 2022. 230 с.
35. Іванов І.В., Петров С.О. Автоматизація та керування в аграрному виробництві. Київ: Наукова думка, 2019. 280 с.
36. Зотов М. Енергозбереження в агротехнологіях. Київ: Енергетика, 2023. 275 с.

37. Смирнов А.І., Кузнєцова Т.В. Інтелектуальні системи управління технологічними процесами. Львів: ЛНУ ім. Івана Франка, 2021. 400 с.
38. Жидецький В. Ц. Основи охорони праці : підруч. 3-є вид., перероб і доп. Львів : УАД, 2006. 336 с.
39. Босов Є. П., Жесан Р. В., Каліч В. М., Голик О. П., Зубенко В. О. Охорона праці при проектуванні систем автоматизації виробництва : навч. посіб. 2-е вид., перероб. і доп. Кропивницький : ЦНТУ, 2022. 208 с.
40. Жидецький В. Ц., Джигирей В. С., Сторожук В. М., Туряб Л. В., Лико Х. І. Практикум з охорони праці. Львів : Афіша, 2000. 352 с.
41. Конституція України. Київ : Вид-во Паливода А. В., 2019. 76 с.
42. Про охорону праці : Закон України. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/main/2694-12#Text> (дата звернення: 01.10.2025).
43. Основи законодавства України про охорону здоров'я : Закон України. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/2801-12#Text> (дата звернення 03.10.2025).
44. Про систему громадського здоров'я : Закон України. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/2573-20#n840> (дата звернення 03.10.2025).
45. Про використання ядерної енергії та радіаційну безпеку : Закон України. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/39/95-%D0%B2%D1%80> (дата звернення 28.09.2025).
46. Про загальнообов'язкове державне соціальне страхування : Закон України. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/1105-14> (дата звернення 10.10.2025).
47. Кодекс цивільного захисту України. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/main/5403-17#Text> (дата звернення: 29.09.2025).
48. Кодекс законів про працю України. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/main/322-08#Text> (дата звернення: 09.10.2025).