

НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ БІОРЕСУРСІВ
І ПРИРОДОКОРИСТУВАННЯ УКРАЇНИ

ІНСТИТУТ ЕНЕРГЕТИКИ, АВТОМАТИКИ І ЕНЕРГОЗБЕРЕЖЕННЯ

ДОПУСКАЄТЬСЯ ДО ЗАХИСТУ

В.о. завідувача кафедри
автоматики та робототехнічних систем
ім. акад. І.І. Мартиненка
(назва кафедри)

к.т.н., доц. _____ О.О. Опришко
(підпис) (ПІБ)

" ____ " _____ 2025 р.

КВАЛІФІКАЦІЙНА БАКАЛАВРСЬКА РОБОТА

на тему **"КОМП'ЮТЕРНО-ІНТЕГРОВАНА СИСТЕМА АВТОМАТИЧНОГО
КЕРУВАННЯ ТЕМПЕРАТУРОЮ ПОВІТРЯ В ПРОМИСЛОВІЙ ТЕПЛИЦІ "**

Спеціальність: 151 - "Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології"

Гарант освітньої програми

д.т.н., проф.
(науковий ступінь та вчене звання)

_____ (підпис)

Заєць Н.А.
(П.І.Б.)

Керівник кваліфікаційної бакалаврської роботи

доктор філософії, асистент
(науковий ступінь та вчене звання)

_____ (підпис)

Ромащук О. М.
(П.І.Б.)

Виконав

_____ (підпис)

Барановський В.О.
(П.І.Б.)

КИЇВ – 2025

**НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ БІОРЕСУРСІВ
І ПРИРОДОКОРИСТУВАННЯ УКРАЇНИ**

ІНСТИТУТ ЕНЕРГЕТИКИ, АВТОМАТИКИ І ЕНЕРГОЗБЕРЕЖЕННЯ

ЗАТВЕРДЖУЮ

В.о. завідувача кафедри
автоматики та робототехнічних систем
ім. акад. І.І. Мартиненка
(назва кафедри)

К.Т.Н., доц. _____ О.О. Опришко
(підпис) (ПІБ)

" ____ " _____ 2025 р.

ЗАВДАННЯ

на виконання кваліфікаційної бакалаврської роботи студенту

Барановському Владиславу Олександровичу

(прізвище, ім'я, по батькові)

Спеціальність: 151 - "Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології"

1. Тема кваліфікаційної бакалаврської роботи: "Комп'ютерно-інтегрована система автоматичного керування температурою повітря в промисловій теплиці",

затверджена наказом ректора НУБіП України від "18" 11 2024 р. № 2056"С"

2. Термін подання завершеної роботи на кафедру "30" травня 2025 р.

3. Вихідні дані до кваліфікаційної бакалаврської роботи:

3.1. Завдання кафедри на виконання кваліфікаційної бакалаврської роботи.

3.2. Нормативні документи по проектуванню об'єктів автоматизації.

3.3. Наукова література з тематики кваліфікаційної бакалаврської роботи.

4. Перелік питань, які необхідно розробити:

4.1. Технологія і промислове обладнання для керування температурою повітря в промисловій теплиці

4.2. Розробка та дослідження математичної моделі керування температурою повітря в промисловій теплиці.

4.3. Вибір регулятора та обґрунтування параметрів його налаштувань.

4.4. Розробка цифрової системи керування.

4.5. Схеми системи автоматизації.

4.6. Техніко-економічне обґрунтування.

5. Перелік графічних документів:

5.1. Функціональна схема система автоматичного керування температурою повітря в промисловій теплиці.

5.2. Комп'ютерно-інтегрована система автоматичного керування температурою повітря в промисловій теплиці. Схема електрична принципова.

- 5.3. Комп'ютерно-інтегрована система автоматичного керування температурою повітря в промисловій теплиці. Електрична схема з'єднань.
- 5.4. Комп'ютерно-інтегрована система автоматичного керування температурою повітря в промисловій теплиці. Електрична схема підключень.
- 5.5. Комп'ютерно-інтегрована система автоматичного керування температурою повітря в промисловій теплиці. Зовнішній вид щита керування.

Дата видачі завдання "21" листопада 2024 року

**Керівник
кваліфікаційної
бакалаврської роботи**

(підпис)

Ромащук О. М.
(П.І.Б.)

**Завдання прийняв до
виконання**

(підпис)

Барановський В.О.
(П.І.Б.)

I. Випускна бакалаврська робота (папка 2025_Барановський В.О.):

1. Робота (2025_Барановський В.О.doc)
2. Реєстраційна форма (Baranovskyi_Forma_Bak.doc)
3. Додатки (рецензії, схеми, програмний код, акти впровадження тощо) – подаються окремими файлами в zip-архіві

Реєстраційна форма

№	Назва поля	Вміст поля
Обов'язкові поля		
1.	Назва роботи	"Комп'ютерно-інтегрована система автоматичного керування температурою повітря в промисловій теплиці"
2.	УДК	
3.	Автор (ПІБ)	Барановський Владислав Олександрович
4.	Дата (рік, місяць, день)	2025.05.30
5.	ННІ	Енергетики, автоматики і енергозбереження
6.	Кафедра (шифр, назва)	02.06 "Автоматики та робототехнічних систем ім. академіка І.І. Мартиненка"
7.	Спеціальність	151 – "Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології"
8.	Керівник (ПІБ, науковий ступінь, вчене звання)	Ромащук Олександр Миколайович, Доктор філософії, асистент
9.	Консультант	
10.	Ключові слова (до 10 слів)	
11.	Анотація (до 300 символів)	
Необов'язкові поля		
	Назва поля	<i>Ім'я файлу</i>
	Перелік додаткових матеріалів*	*.doc
	Архів додаткових матеріалів	*.zip

* Форма подання переліку додаткових матеріалів

№	Назва	Ім'я файлу в архіві
1.		

ЗМІСТ

ВСТУП.....	7
РОЗДІЛ 1. ТЕХНОЛОГІЯ І ПРОМИСЛОВЕ ОБЛАДНАННЯ ДЛЯ КЕРУВАННЯ ТЕМПЕРАТУРОЮ ПОВІТРЯ В ПРОМИСЛОВІЙ ТЕПЛИЦІ	8
1.1 Загальні відомості про промислові теплиці	8
1.2 Технологічний процес регулювання температури	11
1.3 Аналіз сучасних систем автоматизації теплиць.....	19
1.4 Постановка задачі автоматизації	25
1.5 Розробка функціональної схеми автоматизації.....	28
РОЗДІЛ 2. МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ ПРОМИСЛОВОЇ ТЕПЛИЦІ ЯК ОБ'ЄКТА КЕРУВАННЯ ТЕМПЕРАТУРОЮ	31
2.1 Обґрунтування вибору математичної моделі теплиці.....	31
2.2 Передаточна функція об'єкта регулювання температури теплиці	33
2.3 Математичний опис моделі: диференційне рівняння та схема моделювання	34
2.4 Моделювання перехідного процесу нагріву в MATLAB/Simulink.....	36
2.5 Аналіз результатів моделювання.....	38
РОЗДІЛ 3. ПРОЄКТУВАННЯ СИСТЕМИ АВТОМАТИЧНОГО КЕРУВАННЯ ТЕМПЕРАТУРОЮ ПОВІТРЯ ТЕПЛИЦІ.....	41
3.1 Вибір та обґрунтування структури системи керування	41
3.2 Синтез ПІД-регулятора (розрахунок параметрів та моделювання).....	45
3.3 Реалізація алгоритму у автоматизованій системі керування мікрокліматом теплиці	47
Вибір плати Arduino для теплиці.....	48
РОЗДІЛ 4. РОЗРОБКА ЦИФРОВОЇ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ	56
4.1 Інтерфейс моніторингу та керування в Blynk	56

4.2 Реалізація системи керуванням мікрокліматом з Arduino	58
РОЗДІЛ 5: СХЕМИ СИСТЕМИ АВТОМАТИЗАЦІЇ.....	59
5.1 Принципова електрична схема	59
5.2 Схема з'єднань.....	60
5.3 Монтажна схема	61
5.4 Вибір проводів та кабелів.....	65
РОЗДІЛ 6. АНАЛІЗ НАДІЙНОСТІ СИСТЕМИ АВТОМАТИЧНОГО КЕРУВАННЯ МІКРОКЛІМАТОМ ТЕПЛИЦІ ТА ЙОГО ТЕХНІКОЕКОНОМІЧНЕ ОБГРУНТУВАННЯ.....	66
6.1. Теоретичні положення щодо надійності.....	66
6.2. Оцінка надійності основних елементів системи.....	67
6.3. Розрахунок ймовірності безвідмовної роботи системи.....	67
ВИСНОВКИ.....	71
СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ ТА ІНТЕРНЕТ ДЖЕРЕЛ	73
Додаток А Функціональна схема системи керування мікрокліматом в теплиці	77
Додаток В Код для керування мікрокліматом за допомогою Arduino	78

ВСТУП

Сучасне сільське господарство стрімко розвивається у напрямі впровадження автоматизованих технологій, які дозволяють підвищити продуктивність, знизити енергоспоживання та забезпечити стабільну якість продукції. Одним із найважливіших об'єктів для впровадження автоматизованих систем керування є промислові теплиці. Контроль мікроклімату, зокрема температури повітря, є критичним фактором для забезпечення оптимальних умов росту рослин.

У зв'язку з цим актуальним є створення **комп'ютерно-інтегрованої системи автоматичного керування температурою повітря**, яка дозволить не лише підтримувати необхідні параметри мікроклімату, а й оптимізувати використання енергетичних ресурсів. Такі системи базуються на використанні датчиків, виконавчих механізмів, програмованих логічних контролерів (ПЛК) та засобів візуалізації (SCADA), що дозволяють здійснювати гнучке, надійне та ефективне управління.

Мета роботи — розробити комп'ютерно-інтегровану систему автоматичного керування температурою повітря в промисловій теплиці на основі сучасних технічних засобів автоматизації.

Завдання дослідження:

- Провести аналіз обладнання та технологій керування температурою;
- Розробити математичну модель об'єкта;
- Підібрати регулятор і обґрунтувати його параметри;
- Реалізувати цифрову систему керування;
- Розробити схеми підключення і принципову електричну схему;
- Здійснити техніко-економічне обґрунтування системи.

Об'єкт дослідження — система автоматичного керування мікрокліматом промислової теплиці.

Предмет дослідження — методи та технічні засоби реалізації автоматизованого керування температурою повітря.

РОЗДІЛ 1. ТЕХНОЛОГІЯ І ПРОМИСЛОВЕ ОБЛАДНАННЯ ДЛЯ КЕРУВАННЯ ТЕМПЕРАТУРОЮ ПОВІТРЯ В ПРОМИСЛОВІЙ ТЕПЛИЦІ

1.1 Загальні відомості про промислові теплиці

Промислові теплиці – це складні інженерні споруди, призначені для інтенсивного вирощування рослин у контрольованому середовищі протягом усього року. На відміну від невеликих аматорських парників, промислові теплиці характеризуються великою площею (зазвичай від сотень до кількох тисяч квадратних метрів), міцним каркасом (сталь, алюміній) і світлопрозорим покриттям (скло, полікарбонат або спеціальна плівка).



Рис. 1.1 Приклад промислової теплиці ПрАТ "Комбінат "Тепличний"

Головна перевага закритого ґрунту – можливість підтримувати оптимальні мікрокліматичні умови, незалежно від коливань зовнішньої погоди. Це дозволяє цілорічно вирощувати овочі, фрукти, квіти та інші культури з високою врожайністю та якістю. Автоматизація процесів у такій теплиці є ключовим чинником ефективного ведення господарства, оскільки вона дає змогу

мінімізувати людський фактор та оптимально витратити ресурси. Сучасні технології контролю клімату дозволяють точно регулювати основні параметри: температуру повітря, вологість, освітленість, концентрацію CO₂, вентиляцію тощо, створюючи стабільні умови для росту рослин і підвищення їх продуктивності.

Значення контролю мікроклімату. Підтримання оптимального мікроклімату в промислових теплицях безпосередньо впливає на стан і розвиток культур. Температура, вологість, рівень CO₂ та інтенсивність світла – це основні чинники, що визначають правильний ріст рослин. В межах комфортних умов рослини мають кращий фотосинтез і транспірацію, що сприяє швидшому розвитку біомаси і утворенню врожаю. Належний клімат-контроль значно знижує ризик захворювань рослин (оскільки відсутні різкі стресові коливання температури та вологості, що ослаблюють імунітет), гарантує високу якість продукції і одночасно допомагає зменшити витрати енергії. Так, грамотне управління мікрокліматом дозволяє економити паливо та електроенергію завдяки більш точному підтриманню потрібної температури без перегрівів чи переохолоджень. Автоматизована теплиця також скорочує потребу у постійному ручному нагляді: більшість рутинних операцій (полив, опалення, провітрювання) виконуються без участі людини, що знижує трудові витрати і фактор людської помилки.

Конструктивні особливості. Сучасні промислові теплиці зазвичай обладнані системами опалення, вентиляції, зрошення та іноді додаткового освітлення. Каркас і огорожувальні конструкції розраховані на значні снігові та вітрові навантаження, а також мають теплоізоляційні властивості для зменшення тепловтрат. Висота споруди (4–6 м і більше до коника) забезпечує великий об'єм повітря, який служить буфером для стабілізації температури. Зазвичай теплиці об'єднуються в блоки (секції) для полегшення управління кліматом у великих масштабах: кожен блок може мати свій набір сенсорів і регулюючих пристроїв для окремого підтримання параметрів.

В промислових тепличних комплексах може бути передбачено зонування – наприклад, окремі відділення (відсіки) для різних культур або стадій вирощування, у яких вимоги до мікроклімату різняться. У таких випадках клімат-контроль здійснюється по зонах, іноді з використанням кількох датчиків в кожній зоні для отримання усередненого значення. Наприклад, температура повітря в великій теплиці може відстежуватися одразу кількома датчиками, розташованими в різних кінцях і на різних висотах, щоб контролер отримував репрезентативну картину умов у всьому об'ємі. Багатоточкове вимірювання дозволяє уникнути ситуацій, коли локальні відхилення (наприклад, перегрів під стелею або охолодження біля дверей) призводять до неправильної реакції системи керування.

Необхідність автоматизації. У великих теплицях фактор інерційності системи та людських можливостей унеможливорює ефективне ручне підтримання мікроклімату. По-перше, значна теплова інерція (конструкції, ґрунт і велика маса повітря повільно нагріваються і охолоджуються) потребує проактивного керування – заздалегідь вмикати опалення чи вентиляцію, щоб уникнути виходу параметрів за оптимальні межі. По-друге, параметри довкілля можуть змінюватись досить швидко (сонячне випромінювання протягом дня, різке похолодання або потепління надворі), і людина фізично не здатна цілодобово реагувати настільки точно і оперативно, як це робить автоматика.

Комп'ютерно-інтегрована система управління мікрокліматом забезпечує постійний моніторинг умов у теплиці та автоматичне регулювання технологічного обладнання, що дає стабільність процесу вирощування. Користувач системи має змогу здійснювати моніторинг та реагувати на відхилення в режимі реального часу через інтерфейс диспетчерської програми або навіть зі смартфона. Запровадження автоматизації є ключовою передумовою ефективного функціонування тепличного господарства, оскільки вона підвищує продуктивність, прозорість і керованість аграрного бізнесу.

1.2 Технологічний процес регулювання температури

Тепловий режим у теплиці. Температура повітря є одним з найважливіших параметрів мікроклімату, від якого залежить інтенсивність фізіологічних процесів у рослин (фотосинтез, дихання, поглинання води). У промисловій теплиці підтримання оптимальної температури – складне завдання, оскільки протягом доби і сезону теплові умови сильно змінюються. Вдень за сонячної погоди внутрішня температура може різко підвищуватися через парниковий ефект, тоді як вночі та взимку теплиця швидко втрачає тепло через скляні стіни чи плівку. Тому **система регулювання температури** повинна мати засоби як для нагріву, так і для охолодження повітря. Типова тепла схема теплиці включає джерело тепла (котельню або нагрівачі), мережу розподілу тепла (водяні трубопроводи з радіаторами або ґрунтовими гріючими трубками, повітряні калорифери тощо) та засоби вентиляції (кватирки, фрамуги, вентилятори). Управління мікрокліматом здійснюється шляхом керування цими елементами: опаленням – для компенсації тепловтрат при зниженні температури, і вентиляцією/охолодженням – для відведення надлишкового тепла при перегріві.

Опалення теплиці. У промислових тепличних господарствах широко застосовується водяне опалення: в теплиці прокладені труби або радіатори, по яких циркулює гарячий теплоносій (вода або водно-гліколева суміш), нагріта у котельні. Джерелом тепла можуть бути газові або твердопаливні котли, теплоцентраль, геотермальні насоси чи інші установки. Теплоносій подається в декілька контурів обігріву. Зазвичай реалізують нижній (ґрунтовий) обігрів – труби розташовані у ґрунті або біля кореневої зони, та верхній обігрів – труби або реєстри підняті над ґрунтом (уздовж стін і міжрядь) для підігріву повітря.

Може також використовуватися повітряне опалення через калорифери (тепловентилятори), які нагнітають нагріте повітря у простір теплиці. Розподіл тепла по контурах здійснюється через колекторні вузли: тепла вода надходить з

теплового колектора і розподіляється між лініями ґрунтового та повітряного опалення. Для регулювання температури теплоносія застосовують змішувальні вузли з триходовими клапанами. Наприклад, частина зворотної холоднішої води може домішуватися до гарячої в певній пропорції, щоб отримати потрібну температуру подачі в конкретний контур. У енергопункті найчастіше встановлюють **змішувальний клапан (ТСК)** з електроприводом – він автоматично змінює ступінь відкриття і тим самим регулює температуру води, що йде в систему опалення всієї теплиці або окремого її блоку. За сигналом від контролера такий клапан може прикриватися або відкриватися для підтримання заданої температури повітря: якщо в теплиці холодно – клапан більше відкритий на гарячу воду, якщо вже тепло – клапан прикривається, обмежуючи нагрів. В сучасних системах також застосовують насосні групи з частотним приводом, які регулюють подачу теплоносія за допомогою зміни витрати (швидкості потоку) – це дає більш гнучкий і енергоефективний контроль.

Окрім систем центрального водяного опалення, в невеликих теплицях можуть використовуватися **локальні нагрівачі**: електричні нагрівачі (інфрачервоні випромінювачі, теплові гармати), газові конвектори або печі на рідкому паливі. Інфрачервоні обігрівачі випромінюють теплову енергію, прогріваючи не стільки повітря, скільки рослини і ґрунт безпосередньо. Їх перевага – менша інерційність і можливість локального обігріву конкретних ділянок. Проте для великих професійних комплексів основним джерелом залишається водяне опалення з центральною котельнею, оскільки воно легше масштабується і дешевше в експлуатації при значних обсягах.

Вентиляція та охолодження. При надлишку тепла в сонячний день або в період підвищеної зовнішньої температури необхідно охолоджувати теплицю, інакше перегрів негативно вплине на рослини (прискорене висихання, пригнічення росту, теплові ураження листя тощо). Основний спосіб охолодження – **вентиляція**: заміна гарячого внутрішнього повітря на більш прохолодне зовнішнє. У конструкції теплиць для цього передбачені кватирки

(фрамуги) на даху та/або бічних стінах, які можуть відкриватися. У сучасних промислових теплицях, як правило, ряди верхніх фрамуг відкриваються автоматично за допомогою електромеханічних приводів (редукторів) або гідравлічних циліндрів. Приводи підключені до системи керування і отримують команду на відкриття, якщо температура перевищує допустимий рівень. Наприклад, якщо температура повітря сягає верхньої заданої межі $\theta_{\text{макс}}$, система автоматично включає вентиляцію – відкриває кватирки до потрібного кута. При падінні температури до нижньої межі $\theta_{\text{мін}}$ фрамуги, навпаки, закриваються, щоб уникнути переохолодження. Таким чином підтримується баланс: теплиця не перегрівається, але й не переохолоджується.

Окрім природної вентиляції через кватирки, в ряді випадків застосовується **примусова вентиляція** – встановлюються вентилятори (осеві або відцентрові), які прокачують повітря крізь теплицю. Примусова система доцільна для теплиць закритого типу без достатньої площі фрамуг або коли потрібен інтенсивний обмін повітря незалежно від погоди (наприклад, у спекотну безвітряну погоду вентилятори сприяють циркуляції повітря краще, ніж природна тяга). В великих теплицях також встановлюють **циркуляційні вентилятори** (міксери повітря) під стелею, які перемішують повітряні маси всередині – це вирівнює температуру і вологість між верхньою та нижньою зонами, усуває застійні зони. Такі вентилятори постійно або періодично працюють на рециркуляцію повітря, сприяючи однорідності мікроклімату.



Рис. 1.2 Приклад циркуляційного вентилятора на промисловій теплиці

Для охолодження повітря в теплиці крім вентиляції може використовуватися система зволоження (туманоутворення). Дрібнодисперсне розпилення води форсунками під стелею одночасно зволожує і охолоджує повітря за рахунок випаровування води (адіабатичне охолодження). Цей метод ефективний у спеку, особливо при низькій відносній вологості повітря, і часто застосовується в овочевих теплицях та розсадниках. Вода під тиском подається через ряд розприскувачів, утворюючи туман; випаровуючись, волога відбирає тепло у повітря. Така система може знизити температуру на кілька градусів і підтримати вологість на бажаному рівні. Автоматика керує електромагнітними клапанами подачі води до форсунок або частотою роботи насосів туманоутворення. Вентиляція і туманоутворення часто працюють спільно: при відкритих фрамугах розпилення води допомагає швидше охолодити повітря. Проте за дуже високих температур зовнішнього повітря можливості цих засобів обмежені – тоді можуть застосовуватися системи активного охолодження (кондиціонери, абсорбційні охолоджувачі), але це рідко практикується через значні енерговитрати.

Додатковий захист: затінювальні полотна

Ще одним ефективним засобом пасивного охолодження є затінювальні системи (шатри, ролети або сітки), які автоматично чи вручну накривають теплицю в години максимального сонячного випромінювання. Вони знижують інтенсивність проникнення сонячної радіації до 30–70 % (залежно від типу матеріалу), що дозволяє:

- ✓ Зменшити нагрів повітря і конструкцій теплиці
- ✓ Уникнути перегріву рослин
- ✓ Знизити споживання енергії на охолодження

Матеріали полотен можуть бути:

- ❖ поліетиленові плівки зі світловідбиваючим покриттям,
- ❖ алюмінієві або синтетичні сітки з UV-захистом,
- ❖ мобільні рулонні або секційні системи.

Автоматизація включає датчики освітленості та температури, а також електроприводи для розгортання/згорання полотна. У поєднанні з системами вентиляції та туманоутворення затінювальні полотна дозволяють зберегти оптимальний мікроклімат у теплиці, особливо у спекотні дні коли зовнішня температура повітря більша 25-30°C, а сонце в zenіті – хмар немає і температуру в теплиці не можна знизити відомими способами повного відкриття фрамуг та максимальною частотою обертання вентиляторів тоді затінювальні полотна є рятівними що для рослин у теплиці, що для працівників. Система суттєво знижує температуру при повному затіненні в розгорнутому вигляді.



Рис.1.3 Приклад затінювальної системи

Принципи автоматичного регулювання температури. Система автоматизації підтримує температуру в заданому діапазоні шляхом двох основних дій: включення (або посилення) опалення, коли занадто холодно, та включення вентиляції/охолодження, коли занадто жарко. Найпростіший алгоритм – двопозиційний (ON/OFF) контроль з гістерезисом. Наприклад, для певної культури встановлено, що температура не повинна опускатися нижче $+18\text{ }^{\circ}\text{C}$ і не підійматися вище $+30\text{ }^{\circ}\text{C}$, оптимально триматися близько $+23\dots25\text{ }^{\circ}\text{C}$. Контролер порівнює покази датчика з цими порогами і видає команди: якщо $T < 18^{\circ}$ – вмикається нагрів (котел, клапан подачі теплоносія відкривається, калорифери запускаються); коли T підвищиться до, скажімо, 21° – нагрів вимикається. Аналогічно, при перегріві понад 30° – відкривається вентиляція (вмикаються вентилятори або відкриваються кватирки і фрамуги) і працює до зниження температури до $\sim 25^{\circ}$, після чого закривається. Важливо, щоб зони роботи двох систем (нагріву і охолодження) не перетиналися, тобто мав бути нейтральний діапазон, в якому не працює ані опалення, ані охолодження, і температура вільно коливається поблизу оптимуму. Така **гістерезисна зона** запобігає частому перемиканню і одночасній роботі зустрічних систем. У прикладі вище мертва зона між $+22$ і $+24\text{ }^{\circ}\text{C}$, і доки температура знаходиться в цьому сприятливому інтервалі, система лише моніторить її, не вмикаючи ні обігрів, ні провітрювання.

Більш складний підхід – пропорційно-інтегрально-диференційне (ПІД) регулювання, яке плавно змінює інтенсивність нагріву або охолодження залежно від відхилення температури. PID-регулятор, налаштований на повітря теплиці, здатний керувати, наприклад, положенням змішувального клапана чи швидкістю вентилятора не тільки у двох станах «вкл/викл», а в безперервному режимі (від 0% до 100%). Це дає змогу точніше й стабільніше підтримувати температуру без великих коливань. У великих теплицях з високою інерційністю PID-регулятори використовуються разом зі схемами розподілу пріоритетів: спочатку повністю задіюється менш інерційний контур (скажімо, ґрунтового підігріву, який швидко

реагує), а якщо його недостатньо – підключається повітряне опалення. Так само й з охолодженням: спершу відкриваються всі наявні вентиляційні канали, включаються вентилятори, і лише якщо температура продовжує рости – можливе задіяння додаткових заходів (зволоження, затінення).

Енергетичні аспекти. Контроль температури тісно пов'язаний з енергоспоживанням тепличного комплексу. Опалення є одним з найбільш енерговитратних процесів, особливо в зимовий період. Тому технологія регулювання повинна забезпечувати економне використання теплової енергії. Для цього застосовуються такі підходи: нічне зниження температури (в межах допустимого для культури) з метою зменшення витрат палива; використання теплозберігаючих екранів (штор), що опускаються над рослинами на ніч, зменшуючи тепловіддачу назовні; повторний цикл обміну вентиляційного повітря через теплообмінники-рекуператори; автоматичне регулювання теплового режиму з урахуванням освітленості (сонячних припливів) – у більш сонячний день система може трохи знижувати подачу тепла, адже рослини отримують додаткове тепло від сонця. Наприклад, в деяких системах реалізовано динамічне керування середньодобовою температурою: якщо вдень було прохолодніше за норму, то вночі опалення трохи підвищує температуру, компенсуючи добову суму тепла, і навпаки – такий підхід називають інтегральним керуванням температурою за 24 години. Також електронні контролери можуть враховувати прогноз погоди чи поточні зовнішні умови: наявність сонця, силу вітру, температуру назовні, щоб завчасно підготувати теплицю (закрити вікна перед похолоданням тощо).

Таким чином, технологічний процес регулювання температури в сучасній промисловій теплиці – це збалансована система дій (нагрівання, вентиляція, зволоження, затінення), спрямована на підтримання оптимального теплового балансу для рослин при мінімально необхідних енерговитратах і безперервному контролі.

1.3 Аналіз сучасних систем автоматизації теплиць

Автоматизація тепличного мікроклімату пройшла значний шлях розвитку – від простих термостатичних пристроїв до складних комп'ютерних систем із штучним інтелектом. Розглянемо основні типи сучасних систем автоматичного керування в промислових теплицях, їх особливості, переваги і недоліки.

Локальні терморегулятори і прості автомати. Найелементарніший рівень автоматизації – це автономні терморегулятори (термостати), які безпосередньо керують нагрівачами або вентиляторами за заданою температурою. Вони бувають аналогові (механічні або електромеханічні з біметалевою пластиною чи термочутливим елементом) та цифрові. Простий приклад – двоканальний цифровий термостат: він має два реле, одне налаштоване на включення нагріву при падінні температури нижче певного порогу, інше – на включення вентиляції при перевищенні верхнього порогу.

Такий прилад дозволяє автоматизувати підтримку температури в невеликій теплиці з мінімальними витратами. На ринку України є доступними різні моделі терморегуляторів (наприклад, серії ТРМ від ОВЕН, або зарубіжні аналоги Inkbird, Altec та ін.), які здатні комутувати навантаження через вбудовані реле. Важливо при використанні простих термостатів дотримуватися обмежень по струму: часто потужні нагрівачі чи вентилятори підключають через проміжні магнітні пускачі або контактори, щоб сам регулятор не перегорів від великого струму. Перевага таких простих систем – дешевизна і легкість монтажу, а недолік – обмежена функціональність. Вони, як правило, не мають засобів дистанційного контролю, журналювання даних, складних алгоритмів; кожен прилад діє локально, тому в масштабній теплиці може утворитися багато розрізнених регуляторів без централізованої координації.

Сюди ж можна віднести механічні **автопрівітрювачі** – термоприводи для кватирок, що працюють без електрики. Це гідравлічні циліндри, заповнені рідиною, яка розширюється при нагріванні. Циліндр з'єднаний з рамою фрамуги,

і коли в теплиці спекотно, він штовхає вікно відкриватися, а при охолодженні – закриває за рахунок пружини. Такі пристрої (наприклад, **Thermoment**, **Univent** та ін. виробництва Данії) користуються популярністю для невеликих господарств: вони прості, автономні і не потребують нагляду.

Автоматичне провітрювання на термоприводах вирішує проблему надходження свіжого повітря і випуску надлишку тепла навіть у випадку, якщо персонал відсутній декілька днів. Звичайно, можливості цих механізмів обмежені (вони відкриваються лише за певної температури і не піддаються динамічному керуванню), тому у великому комплексі їх роль може бути хіба що резервною – на випадок аварійного знеструмлення електричних систем, щоб теплиця могла провітритися пасивно.

Комп'ютеризовані клімат-контролери. Наступний рівень – спеціалізовані **клімат-комп'ютери** для теплиць. Це інтегровані системи, які збирають показники від багатьох датчиків і керують різними підсистемами (опалення, вентиляція, освітлення, полив, дозування CO₂) за заданими сценаріями. Подібні системи часто пропонуються як готові рішення від компаній-виробників тепличного обладнання. Прикладами є: *Priva*, *Hoogendoorn*, *Sercom*, *Netafim*, *Climatic* та інші відомі на ринку клімат-контролю. Такі контролери зазвичай являють собою шафу з електронними модулями та програмним забезпеченням, яке виконує складні регуляторні алгоритми.

Контролер з підключеним комп'ютером дає змогу задавати добові криві температури, різні режими для дня і ночі, автоматично компенсувати температуру залежно від рівня сонячної радіації чи фази росту рослин. Він отримує дані від десятків датчиків: температури всередині теплиці (у різних зонах), вологості, температури ґрунту, температури зовнішнього повітря, швидкості і напрямку вітру, освітленості, концентрації CO₂ тощо. На основі цієї інформації контролер обчислює оптимальні дії: наприклад, при різкому посиленні сонця може трохи відкрити фрамуги навіть до досягнення критичної

температури, або завчасно прикрити їх при сильному вітрі, щоб уникнути протягів. Команди надсилаються на виконавчі механізми через відповідні інтерфейси – релейні виходи, аналогові сигнали, або цифрові шини.

Клімат-комп'ютери зазвичай підтримують роздільне керування кількома контурами опалення: можуть модулювати клапани ґрунтового та повітряного обігріву окремо, вмикати секції калориферів, перемикати режими роботи котлів (нагрів або економ-режим). Одночасно вони керують *системами вентиляції*: приводами відкриття кватирок (частково чи повністю, що дозволяє керувати обсягом інтенсивності вентиляції), швидкістю обертів вентиляторів та повітрозабірними жалюзі. Вбудовані алгоритми не допускають надмірного коливання параметрів – наприклад, провітрювання може здійснюватися за принципом **каскадного регулювання**: спочатку відкривається 10% площі фрамуг, якщо цього мало – 20%, 50% і т.д. Крок відкриття контролер вибирає автоматично залежно від різниці між фактичною і цільовою температурами.

Більшість сучасних промислових теплиць оснащуються саме такими багатофункціональними комп'ютерними системами. Вони часто інтегруються з системами зволоження та поливу: фактично єдина центральна система слідкує за всіма аспектами мікроклімату і навіть процесом живлення рослин. Наприклад, клімат-комп'ютер **Sercom** (Нідерланди) може одночасно управляти температурним режимом (опаленням, вентиляцією, екранами, рециркуляцією повітря), вологісним режимом (туман, провітрювання, штори), освітленням (досвітка лампами за графіком), подачею CO₂, а також контролювати процес приготування добрив і крапельного поливу. Такий рівень інтеграції особливо важливий у високотехнологічних тепличних комплексах, де всі системи взаємопов'язані.

Системи на базі ПЛК (програмованих логічних контролерів).

Альтернативним шляхом автоматизації є використання універсальних промислових ПЛК і SCADA-систем. Цей підхід часто застосовується при модернізації теплиць або в разі, коли господарство прагне створити власну систему керування під індивідуальні потреби. Програмований логічний контролер (наприклад, Siemens SIMATIC, Schneider Modicon, Owen ПЛК тощо) виступає мозком системи: в нього надходять сигнали від датчиків, і він за заданою програмою формує вихідні дії на обладнання. ПЛК відрізняються високою надійністю, продуктивністю і гнучкістю програмування – інженер може закласти будь-які алгоритми керування, відповідні специфіці теплиці. Зазвичай схема виглядає так: на першому, нижньому рівні – польові пристрої (датчики температури, вологості, виконавчі механізми: електроклапани, двигуни, насоси) і локальні контролери чи мікропроцесори, що безпосередньо пов'язані з обладнанням; на другому рівні – промисловий контролер (ПЛК), який збирає дані з усіх датчиків, виконує розрахунки та посилає команди на механізми; на третьому рівні – комп'ютер з програмним забезпеченням SCADA/HMI, що забезпечує інтерфейс оператора, архівування даних, тривожні повідомлення тощо. Наприклад, рішення на базі ПЛК можуть використовувати SCADA-систему **Siemens WinCC**: оператор бачить на екрані мнемосхему теплиці, де в режимі реального часу відображаються показники (температура повітря, ґрунту, зовнішня температура, стан клапанів і вентиляторів, рівень CO₂ та ін.). Він може задавати параметри – бажану температуру вдень і вночі, допустимі межі, таймери тощо – через зручний графічний інтерфейс. SCADA також веде журнали тенденцій (тренди), де накопичуються графіки температури, вологості за тривалий період, реєструє аварійні ситуації (наприклад, перегрів або вихід з ладу датчика). Система підтримує дистанційний доступ: дані можуть передаватися на диспетчерський пункт чи навіть на мобільний застосунок.

Перевагою використання стандартних ПЛК є велика гнучкість – можна підібрати будь-які датчики і виконавці, легко змінити логіку роботи через

перепрограмування, інтегрувати управління теплицею з іншими виробничими процесами підприємства. Крім того, немає прив'язки до одного виробника: доступний широкий вибір обладнання та компонентів. Наприклад, датчики температури можуть бути резистивні термометри опору **Pt100/1000** з перетворювачами сигналу 4–20 мА, цифрові сенсори на шині **Modbus**, аналізатори CO₂ з аналоговим виходом, гігromетри для вологості і т.д. Виконавчі механізми – клапани з електроприводом (виробників *Belimo, Siemens, Johnson Controls*), вентилятори з частотними перетворювачами (для плавного регулювання швидкості обертання), приводи відкриття фрауг (наприклад, мотор-редуктори *Ridder*), насосні станції з електронними контролерами. Всі ці пристрої можуть бути підключені до ПЛК через відповідні модулі введення/виведення або мережеві інтерфейси (цифрові протоколи). Таким чином, комбінуючи стандартні апаратні і програмні засоби, створюють індивідуальну систему клімат-контролю.

Використання мікрокомп'ютерів та IoT. Все частіше зараз починають застосовувати недорогі мікрокомп'ютери (наприклад, **Arduino, Raspberry Pi, ESP8266/ESP32**) та Інтернету речей для автоматизації невеликих теплиць. В останні роки набули популярності проекти «розумних теплиць» на відкритих апаратних платформах. Вони цікаві тим, що при відносно низькій вартості можна отримати досить розвинуту функціональність: бездротові сенсори, хмарне зберігання даних, керування через веб-інтерфейс, повідомлення на смартфон про стан теплиці тощо. Наприклад, група дослідників у 2023 році проаналізувала існуючі системи клімат-контролю і запропонувала побудову нової системи на основі двох мікроконтролерів Arduino (ATmega328P) та Wi-Fi модуля ESP8266, з підключенням цифрових датчиків температури/вологості **DHT22**. Метою було здешевити систему, зберігши необхідний функціонал – і така саморобна система за своїми можливостями не поступалася дорогим комерційним аналогам.

Подібні рішення часто використовують для невеликих фермерських або навіть присадибних теплиць, де немає сенсу інвестувати в промислові

контролери. Мікрокомп'ютер Raspberry Pi може слугувати і контролером, і інтерфейсним пристроєм, запускаючи скрипти моніторингу та управління параметрами (температурою, вологістю, освітленням) та надаючи веб-сторінку для користувача. Основні недоліки таких систем – потреба в кваліфікації для налаштування і підтримки (власнику теплиці потрібно розумітися на електроніці та програмуванні) та дещо нижча надійність у порівнянні з промисловими ПЛК. Тим не менш, розвиток IoT дає змогу вже зараз впроваджувати у теплицях недорогі бездротові датчики (наприклад, мережі на базі протоколів ZigBee, LoRaWAN) для збору мікрокліматичної інформації, а керування виконувати через хмарні сервіси. Такий підхід поки що не надто поширений на рівні великих промислових теплиць через питання кібербезпеки та стабільності, але для локальних господарств – цілком реальна альтернатива.

Порівняння та тенденції. Сучасні системи автоматизації теплиць можна умовно поділити за критерієм ступеня інтеграції: *локальні (децентралізовані) контролери* та *централізовані комплексні системи*. Локальні контролери простіші в інсталяції і дешевші, але часто працюють ізольовано і не «спілкуються» між собою, що може призводити до неузгодженості дій (наприклад, окремий гігростат подає туман, тоді як термостат одночасно відкриває вентиляцію – і ефект заходів частково втрачається). Централізована система, навпаки, забезпечує координацію всіх підсистем: відбувається єдиний інтелектуальний вибір оптимального сценарію (напр., якщо дуже жарко і сухо, комп'ютер може вирішити: спершу трохи притінити, потім увімкнути туман і лише потім привідкрити фрамуги, щоб знизити вологість разом з температурою, але не пошкодити рослини протягом).

Провідні світові тепличні комплекси активно впроваджують системи з елементами штучного інтелекту та машинного навчання, які здатні прогнозувати зміни клімату і відповідно коригувати налаштування. Наприклад, використовуються нейромережеві моделі для прогнозування температури і вологості на декілька годин вперед, на основі яких система завчасно підлаштовує

режими опалення і вентиляції. Такі проекти відомі під концепцією “**smart greenhouse**”, коли теплиця сама навчається оптимізувати мікроклімат під цільові показники росту.

Одним з трендів є підвищення **енергоефективності** автоматизованих теплиць. Це досягається як на рівні обладнання (використання конденсаційних котлів, теплових насосів, світлодіодної досвітки), так і на рівні керування (точніші алгоритми регулювання, врахування тарифів електроенергії для перемикання режимів, інтеграція з системами зберігання енергії). Автоматика теплиць дедалі тісніше пов’язана з загальною автоматизованою системою підприємства – передача даних про енергоспоживання, прогноз врожайності, стан обладнання дозволяє оптимізувати бізнес-процеси.

Аналіз прикладів показує, що провідні сучасні системи (такі як **Priva** або **Grodan**) є дорогими у впровадженні, але надійними і високоточними. Натомість бюджетні рішення на основі ПЛК чи мікроконтролерів значно дешевші, проте вимагають грамотного проектування і кваліфікованого обслуговування. Загалом, вибір системи автоматизації залежить від масштабу теплиці, фінансових можливостей господарства та необхідного рівня контролю. У цьому проекті ставиться завдання розробити комп’ютерно-інтегровану систему, яка поєднає переваги індивідуального підходу (гнучкість, адаптивність) з надійністю промислових рішень, при цьому використовуючи сучасні доступні компоненти.

Сучасний рівень розвитку технологій дозволяє повністю контролювати мікроклімат теплиці 24/7 з мінімальним втручанням людини. Це підтверджується широким впровадженням автоматизованих тепличних комплексів, де за рахунок комп’ютерного управління досягнуто стабільного підвищення врожайності та якості продукції на 20–30% при одночасному зниженні витрат ресурсів.

1.4 Постановка задачі автоматизації

Опис об'єкта керування. Об'єктом автоматизації в даній роботі є промислова теплиця для вирощування овочевих культур, оснащена системами опалення та вентиляції. Розглядається теплиця площею, 100 м², з остекленням із полікарбонату, розбитою на дві виробничі зони. Теплиця має опалення від електричних тенів та опалення ґрунту за допомогою водяного котла. Для вентиляції передбачені автоматичні кватирки на дахових скатах (з електроприводами) та додатково два витяжні вентилятори на торцевих стінах. Також на даху встановлено сенсорну метеостанцію (вимірювання зовнішньої температури, швидкості вітру, освітленості). Внутрішній мікроклімат контролюється такими датчиками: *датчик температури повітря* (в кожній зоні по 2 шт. для надійності і усереднення показів), *датчик відносної вологості повітря*, *датчик температури ґрунту*.

Основний параметр для підтримання – **температура повітря**, яка повинна утримуватись в межах, оптимальних для вирощуваної культури (томати: вдень 24±2 °С, вночі не нижче 18 °С). Допустимі коливання – не більше ±2...3 °С від заданого рівня, аби уникнути стресу рослин. При цьому слід враховувати зв'язок температури з вологістю: занадто висока температура при низькій вологості призводить до в'янення, а висока вологість при зниженій температурі – до конденсації і розвитку хвороб. Тому автоматизація має забезпечити скоординоване керування системами опалення і вентиляції, можливо із залученням зволоження, щоб дотримуватися не тільки діапазону температур, а й підтримувати відносну вологість у комфортних межах (~60–75% для більшості овочевих культур).

Мета автоматизації: розробити комп'ютерно-інтегровану систему автоматичного керування, яка здатна підтримувати задану температуру повітря в теплиці незалежно від зміни зовнішніх умов, з мінімальними енергозатратами і забезпеченням необхідної надійності та безпеки. Система повинна виконувати такі функції:

- **Автоматичне регулювання температури:** вимірювати поточну температуру, порівнювати із заданим значенням (заданим графіком) і за потреби керувати нагрівом чи вентиляцією.
- **Моніторинг параметрів:** безперервно збирати дані від усіх датчиків (температура, вологість, зовнішні умови тощо) і передавати їх на диспетчерський пункт (комп'ютер оператора) для відображення та контролю в реальному часі.
- **Логіка аварійного захисту:** у разі нештатних ситуацій вживати заходів безпеки – наприклад, при аварійному перегріві (>30 °C) повністю відкрити всі вентиляційні елементи і ввімкнути вентилятори на максимальну потужність; при виході температури за нижню межу або відмові опалення – генерувати аварійний сигнал, можливо включати резервні нагрівачі. Також передбачити аварійне знеструмлення нагріву при перегріві котла або примусове відкриття фрауг при знеструмленні для запобігання знищенню врожаю.
- **Гнучкість налаштувань:** система має дозволяти оператору змінювати уставки температури (наприклад, денну і нічну), налаштовувати часові інтервали (режим день/ніч, провітрювання за розкладом), калібрувати датчики, перемикаючи режими (автоматичний/ручний).
- **Інтеграція з верхнім рівнем:** оскільки система комп'ютерно-інтегрована, вона повинна мати інтерфейс до персонального комп'ютера з програмним забезпеченням SCADA або іншим HMI. Це надасть людині зручний доступ до керування (через екран з мнемосхемою), а також збереже історичні дані для аналізу ефективності. Бажано забезпечити дистанційний доступ – наприклад, через інтернет, з авторизацією, щоб відповідальні особи могли перевірити стан теплиці або отримати негайне сповіщення про аварії.
- **Дотримання стандартів:** при розробці системи слід врахувати чинні стандарти проектування систем автоматизації, зокрема вимоги до документації, надійності та сумісності. Функціональна схема і вибір

приладів мають відповідати стандартам галузі, а компоненти – мати необхідні технічні сертифікати.

Отже, сформульована **задача автоматизації**: створити систему автоматичного регулювання температури повітря промислової теплиці, що включає підсистему вимірювання (датчики температури та інші), підсистему управління (контролер з відповідним програмним забезпеченням алгоритму регулювання) та підсистему виконуючих механізмів (приводи клапанів опалення, мотор-фрамуги, вентилятори). Система повинна підтримувати оптимальний мікроклімат для рослин при мінімальному залученні персоналу, забезпечувати можливість контролю і корекції з боку оператора, а також гарантувати безпечну експлуатацію обладнання.

1.5 Розробка функціональної схеми автоматизації

Принципи побудови функціональної схеми. Функціональна схема автоматизації – це графічне відображення всіх основних елементів системи керування (контрольно-вимірювальних приладів, виконавчих пристроїв, контролерів, каналів зв'язку) та їх взаємозв'язків з об'єктом автоматизації. При розробці схеми керування температурою повітря в теплиці необхідно відобразити: датчики температури (і інших параметрів, якщо залучені), контролер або інший обчислювальний блок, виконавчі механізми систем опалення та вентиляції, а також зв'язки між ними (сигналізація, силові лінії керування).

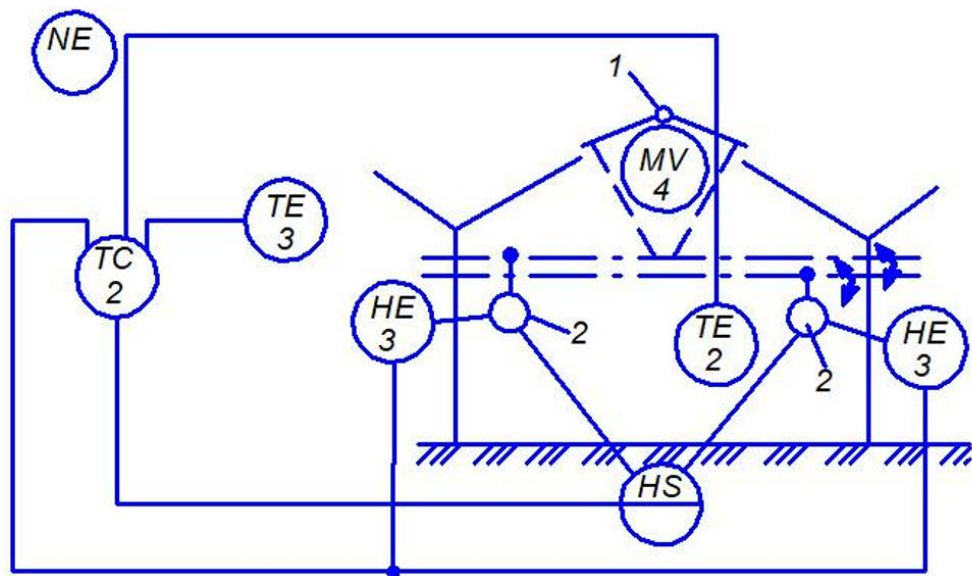


Рис.1.4 Функціональна схема системи керування мікрокліматом в теплиці

На функціональній схемі (рис. 1) зображено взаємозв'язок між основними елементами автоматизованої системи керування температурним режимом у теплиці. Основними функціональними блоками системи є:

- **TE2, TE3** — датчики температури, що встановлені всередині теплиці для постійного контролю значення температури повітря;
- **TC2** — керуючий елемент (ПЛК або температурний контролер), який порівнює виміряну температуру з уставкою та формує керуючі дії;
- **HE3** — нагрівачі, що забезпечують підвищення температури у разі її зниження нижче встановленого значення;
- **MV4** — моторизований виконавчий механізм фрамуги, який здійснює відкривання або закривання вентиляційного отвору;
- **HS** — команда запуску нагріву (може реалізовуватись вручну або автоматично від ПЛК);
- **1, 4** — умовні позначення виконавчих елементів (фрамуга, вентилятор);
- **NE** — нейтраль ланцюга живлення.

Система реалізує замкнуту структуру регулювання температури: сигнал з датчика надходить до ПЛК, який на основі заданої уставки формує керуючі впливи — вмикає нагрівач або приводить у дію фрамугу для провітрювання.

РОЗДІЛ 2. МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ ПРОМИСЛОВОЇ ТЕПЛИЦІ ЯК ОБ'ЄКТА КЕРУВАННЯ ТЕМПЕРАТУРОЮ

2.1 Обґрунтування вибору математичної моделі теплиці

Промислова теплиця характеризується значною тепловою інерцією та повільною динамікою зміни температури повітря. Це обумовлено великою теплоємністю внутрішнього середовища – повітря, ґрунту та конструкцій, які накопичують тепло, а також тепловими втратами через огорожувальні конструкції. При подачі теплової енергії (наприклад, увімкненні нагрівача) температура в теплиці не підвищується миттєво, а зростає поступово, оскільки значна частина енергії йде на нагрів масивного об'єму повітря та елементів конструкції. Таким чином, теплиця може розглядатися як **об'єкт з великим запасом теплової енергії** (тепловою інерцією) та повільною реакцією на керуючі впливи. Для спрощення аналізу приймається припущення про однорідність повітря в теплиці – так звану модель «ідеально змішаної камери», де температура в усіх точках внутрішнього об'єму вважається однаковою. Це допускає опис теплиці як єдиного узагальненого теплообмінного вузла із середньою температурою повітря.

При математичному моделюванні температурної динаміки доцільно використовувати підхід, заснований на енергетичному балансі. Загальне рівняння теплового балансу для об'єкта з теплоємністю можна записати як:

$$Q, m \cdot C \frac{d\theta}{dt} = Q$$

де m – маса середовища що нагрівається (повітря та конструкцій), C – його середня питома теплоємність, θ – температура, Q – результуючий тепловий потік (різниця між підведеним та відведеним теплом). Це рівняння показує накопичення теплової енергії: зміна внутрішньої енергії пропорційна різниці між надходженням тепла (від нагрівачів, сонячної радіації тощо) та втратами (через теплообмін із зовнішнім середовищем, вентиляцію, ґрунт).

На основі цього рівняння можна отримати диференціальне рівняння для температури повітря в теплиці. Враховуючи, що втрати тепла пропорційні різниці температур між внутрішнім повітрям T_{in} і зовнішнім середовищем T_{out} (згідно із законом Ньютона про охолодження), а нагрівальний вплив залежить від поданої потужності нагрівача $Q_{heat}(t)$, спрощене рівняння теплового балансу можна подати у вигляді:

$$C_{eq} \frac{dT_{in}(t)}{dt} = Q_{heat}(t) - K_{loss} \cdot (T_{in}(t) - T_{out})$$

де C_{eq} – еквівалентна теплоємність (теплоємність повітря та конструкцій теплиці), K_{loss} – ефективний коефіцієнт тепловіддачі (характеризує сумарні теплові втрати через стіни, покриття, інфільтрацію повітря тощо). Це рівняння описує, як швидкість зміни температури залежить від різниці між потужністю нагріву і втратами тепла. Така модель є типовою лінійною апроксимацією динаміки температури у теплиці. При відсутності керуючого впливу (нагріву) система прагне досягти температури зовнішнього середовища T_{out} , а при постійному нагрівальному впливі – усталеної температури, за якої тепловий потік від нагрівача врівноважується втратами.

З точки зору теорії автоматичного керування, подібні теплові об'єкти часто описуються як **аперіодичні (інерційні) ланки**. Через значне згасання і відсутність коливальних процесів, передаточна функція теплиці може бути подана як об'єкт першого порядку з запізненням. Багато дослідників протягом тривалого часу використовували саме *першорядну модель із запізненням* для опису температури в теплицях. Такий підхід є обґрунтованим, оскільки добре відображає повільну експоненційну реакцію системи на зміну теплового впливу. Запізнення при цьому враховує часову затримку між подачею тепла і фактичним відгуком температури – наприклад, через інерцію нагрівального обладнання, затримку транспортування тепла в об'ємі повітря, а також запізнення вимірювального приладу.

Альтернативно, деякі дослідники пропонують моделі вищого порядку для більш точної відповідності реальності. Зокрема, можлива модель у вигляді інерційної ланки другого порядку, яка враховує два джерела інерційності – наприклад, окремо для повітря та конструкцій чи ґрунту. Існують роботи, де ідентифікація динаміки теплиці давала найкраще наближення саме другою порядковою функцією. Це свідчить, що **модель першого порядку з запізненням** у багатьох випадках є не тільки спрощеним, а й цілком адекватним описом об'єкта керування температурою. Отже, надалі в роботі доцільно використати саме апроксимацію теплиці аперіодичною ланкою із запізненням.

2.2 Передаточна функція об'єкта регулювання температури теплиці

На основі зроблених припущень та спрощень побудуємо передаточну функцію теплиці як об'єкта керування температурою. Відповідно до прийнятої моделі, теплиця розглядається як лінійна інерційна ланка з запізненням. Загальний вигляд такої передаточної функції – *аперіодична ланка першого порядку із запізненням* – можна записати наступним чином:

$$W_{\text{тепл}}(s) = \frac{K e^{-\tau_d s}}{Ts + 1}$$

де K – статичний коефіцієнт підсилення (коефіцієнт передачі по нагрівному каналу), T – стала часу (інерційна стала) об'єкта, τ_d – чисте запізнення в реакції (час запізнювання). У цій моделі *ступінчаста зміна* керуючого впливу (подачі тепла) призводить до експоненціального переходу температури до нового усталеного значення, яке дорівнює K (помноженому на величину зміни впливу). Часова затримка τ_d означає, що протягом інтервалу τ_d після зміни впливу система практично не реагує (відгук відсутній або мінімальний), і лише по завершенні цього інтервалу починається зростання температури.

При цьому параметри K , T та τ_d суттєво залежать від конструкції теплиці, її розмірів, теплоізоляції, характеристик нагрівальної системи, а також від умов експлуатації. У різних джерелах можна знайти приклади числових значень цих параметрів. Зокрема, для типового сучасного тепличного модуля наводяться такі орієнтовні величини: коефіцієнт підсилення $K \approx 75$, стала часу $T \approx 214$ с (близько 3.6 хвилини), а час запізнювання $\tau_d \approx 120$ с (2 хвилини). В іншому джерелі, де проводилось графічне визначення динаміки розігріву повітря, отримані дещо більші значення: $\tau_d = 1900$ с (≈ 32 хв), $T = 2620$ с (≈ 43.7 хв). Така значна різниця пояснюється різними масштабами теплиць та умовами: у великому тепличному комплексі з повільною системою опалення перехідні процеси можуть розтягуватися на десятки хвилин. У подальшому моделюванні оберемо усереднені оцінки параметрів, що відповідають реальній промисловій теплиці середніх розмірів з повітряним опаленням.

2.3 Математичний опис моделі: диференційне рівняння та схема моделювання

Передаточній функції теплиці $W_{\text{тепл}}(s) = \frac{Ke^{-\tau_d s}}{Ts+1}$ у часовій області відповідає лінійне диференційне рівняння першого порядку із запізненням. Якщо позначити $T_{\text{вих}}(t)$ – температуру повітря в теплиці (вихідна координата об'єкта), а $u(t)$ – керуючий вплив (наприклад, відносна потужність нагрівача, нормована до відрізка $[0,1]$), то математичну модель можна записати як:

$$T \frac{dT_{\text{вих}}(t)}{dt} + T_{\text{вих}}(t) = K * u(t - \tau_d)$$

Це рівняння є еквівалентним передаточній функції і означає, що швидкість зміни температури пропорційна різниці між поточною температурою і певним **запізнілим** значенням, до якого система буде прагнути. Без запізнення $\tau_d = 0$ воно спрощується до класичного рівняння аперіодичної ланки (реагує на зміни $u(t)$ негайно).

$$T \cdot \frac{dT_{\text{вих}}}{dt} + T_{\text{вих}} = K \cdot u(t)$$

При додавання запізнювання $u(t - \tau_d)$ враховуємо, що реакція починається через інтервал τ_d . Таким чином, T визначає, наскільки швидко температура наближається до нового режиму (чим менша T , тим швидше об'єкт реагує), а τ_d визначає затримку цієї реакції на початку.

$$W(p) = \frac{0,16 * e^{-7p}}{36p + 1}$$



Рис 2.1 Структурна схема перехідного процесу в Simulink для контуру регулювання температури

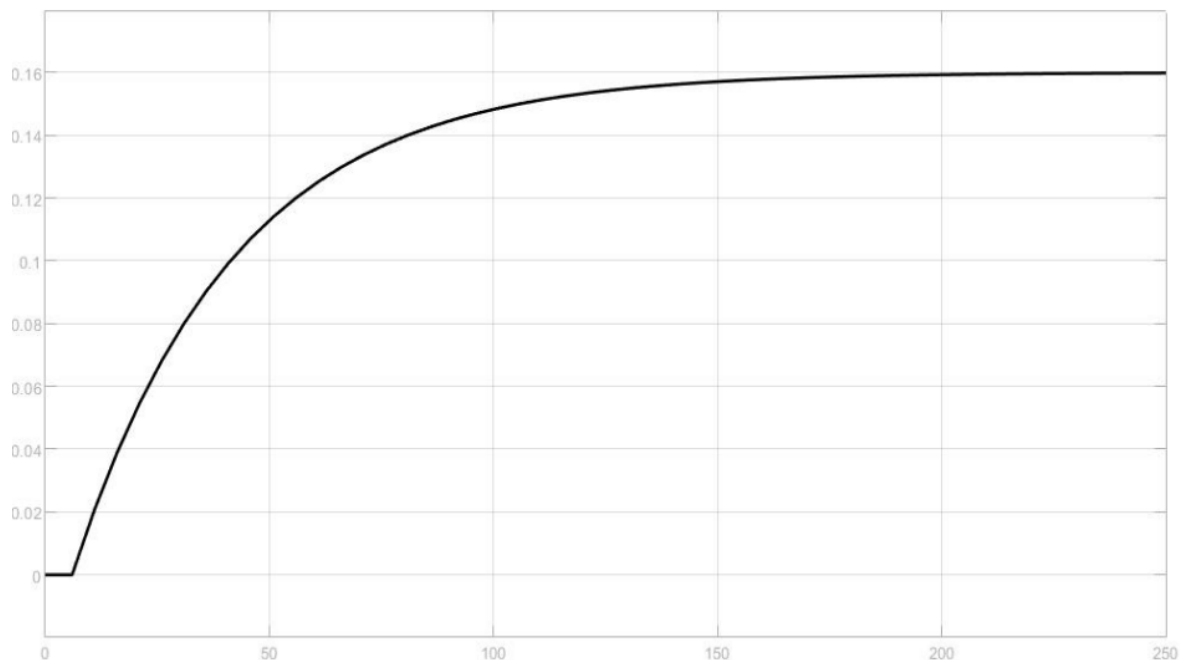


Рис 2.2 Перехідна характеристика контуру регулювання температури

Для імітаційного моделювання побудуємо еквівалентну *блок-схему* у середовищі MATLAB/Simulink. На рис. 2.1 зображено концептуальну структуру моделі: послідовно з'єднані блок запізнення та інерційний блок першого порядку. Подача $u(t)$ спочатку проходить через блок Transport Delay із параметром часу затримки τ_d , а потім – через блок динамічної ланки з передаточною функцією $\frac{K}{Ts+1}$, що реалізує диференціальне рівняння першого порядку. На виході отримується змінна $T_{\text{вих}}(t)$ – температура повітря в теплиці.

Для реалізації такої моделі у Simulink використовуються стандартні бібліотечні блоки. Зокрема, блок **Transport Delay** забезпечує введення запізнення на заданий час у каналі керування. Інерційна ланка першого порядку може бути реалізована за допомогою блоку **Transfer Fcn** з передаточною функцією $K/(Ts + 1)$ (у параметрах цього блока задаються коефіцієнти чисельника і знаменника). На вході до Transfer Fcn підключається вихід блоку Transport Delay. Таким чином, сформована модель точно відповідає передаточній функції $W_{\text{тепл}}(s)$.

2.4 Моделювання перехідного процесу нагріву в MATLAB/Simulink

Для перевірки адекватності математичної моделі проведемо імітаційний експеримент – змоделюємо **перехідний процес нагріву повітря в теплиці** при подачі теплового впливу. В якості початкових умов візьмемо теплицю у стані теплової рівноваги з довкіллям (внутрішня температура дорівнює зовнішній T_{out}). У момент часу $t = 0$ подамо ступінчастий керуючий вплив – наприклад, різке ввімкнення нагрівача на постійну потужність ($u(t)$ змінюється з 0 до 1, що відповідає 100% нагріву). На цю зміну система буде реагувати підвищенням температури до деякого нового усталеного значення $\Delta T_{\text{уст}}$ (приріст температури відносно початкової). Моделювання проведемо з такими параметрами моделі, близькими до середньостатистичних: коефіцієнт підсилення $K = 1$ (нормуємо приріст температури до відносних одиниць для зручності), стала часу $T = 2000\text{с}$

(≈ 33.3 хв) та час запізнення $\tau_d = 1000\text{с}$ (≈ 16.7 хв). Ці значення лежать в межах опублікованих даних і відповідають повільному тепловому процесу.

Налаштування моделі в Simulink: було використано блок Transport Delay (Delay = 1000 с) та блок Transfer Fcn зі знаменником $Ts + 1 = 2000s + 1$ і передатним коефіцієнтом $K = 1$. Інтеграційний крок моделювання обрано достатньо малим (наприклад, 1 с) для точної прорисовки перехідної характеристики тривалістю декілька годин. На вході моделі сформовано сигнал Step, який змінюється з 0 до 1 у нульовий момент (це імітує раптове ввімкнення нагрівача на повну потужність). На виході блоку Transfer Fcn отримано значення відносного підвищення температури $\Delta T(t) = T_{\text{вих}}(t) - T_{\text{out}}$.

Результати моделювання наведені на рисунку нижче. Графік ілюструє зміну температури всередині теплиці після увімкнення нагріву.

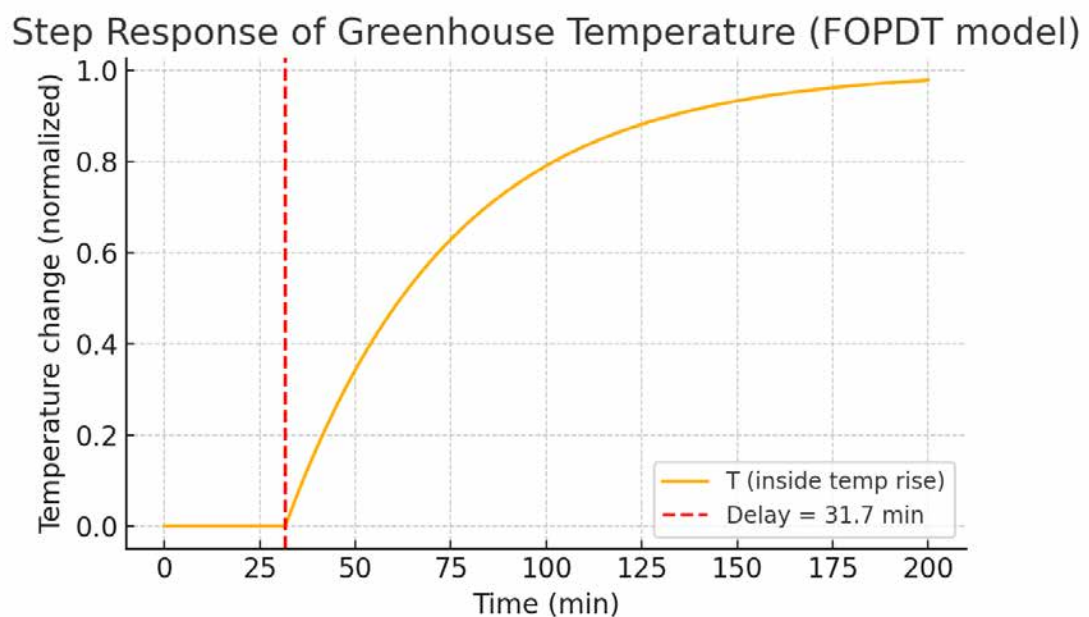


Рис. 2.3. Перехідна характеристика моделі температури повітря в теплиці

Як бачимо з рис. 2.1, реакція системи починається не одразу: протягом інтервалу часу приблизно 30–32 хвилин температура майже не змінюється (крива залишається на початковому рівні). Цей початковий горизонтальний відрізок відповідає *мертвому часу* τ_d , закладеному в модель. Після цього

інтервалу крива температури починає зростати – це відповідає тому, що нагрівач почав фактично впливати на внутрішній клімат після поширення тепла. Форма перехідної функції має чітко виражений аперіодичний характер (експоненціальне зростання без коливань та перевищення усталеного рівня). Температура асимптотично наближається до нового усталеного значення. За вибраних нормованих одиниць $K = 1$, це значення дорівнює 1 (що інтерпретується як приріст на 100% відносно початкової різниці температур). Таким чином, через достатньо великий проміжок часу (кілька часових сталих T) крива виходу виходить на плато, досягнувши $\Delta T_{уст} = 1.0$ (100% від бажаного приросту).

2.5 Аналіз результатів моделювання

Отриманий перехідний процес дозволяє проаналізувати динамічні характеристики моделі теплиці та підтвердити їх фізичний зміст:

Часова затримка τ_d чітко проявляється на початку перехідної характеристики (рис. 2.3): система демонструє відсутність відгуку до моменту $t = \tau_d$. У нашому прикладі $\tau_d = 1000$ с, або ~ 16 хвилин – після цього моменту крива температури відходить від нульового рівня. В реальних умовах наявність запізнення пояснюється транспортними затримками передачі тепла та інерційністю обладнання. Значення τ_d має велике значення для налаштування систем керування – воно суттєво обмежує швидкодію контуру регулювання і часто вимагає застосування спеціальних методів компенсації запізнення (наприклад, використання передикторів Сміта тощо).

Стала часу T (інерційність) визначає швидкість експоненціального наближення температури до нового значення. З графіка можна оцінити цю характеристику: час T – це інтервал, за який система досягає приблизно 63% від свого повного приросту. На рис. 2.1 повний приріст нормовано до 1, отже 0.63 відповідає 63%. Видно, що приблизно за $T \approx 33$ хв після завершення затримки температура досягає ~ 0.63 . Точніше, задане значення $T = 2000$ с (33.3 хв)

узгоджується з графіком – крива перетинає рівень 0.63 близько $t \approx 75$ хв (що включає ~ 32 хв запізнення + 43 хв самого перехідного процесу). Таким чином, експоненційна складова моделі адекватно відтворює повільний нагрів теплиці. Велика стала часу означає «сповільненість» об'єкта: потрібні десятки хвилин, щоб температура наблизилася до нового режиму навіть після початку реакції. Це узгоджується з реальними спостереженнями: теплиця дійсно має значну теплову інерцію і не може швидко нагрітися або охолонути.

Усталене значення (коефіцієнт передачі K) у моделі рівне 1 (нормалізовано). В реальній температурі це значення відповідало б досягнутому приросту температури. Якщо, скажімо, нагрівач забезпечує підняття температури на $5\text{ }^\circ\text{C}$ вище зовнішньої, то $K = 5\text{ }^\circ\text{C/од. керування}$ (при переході від 0 до 1 на вході). У нашому прикладі $K = 1$, тобто 100% потужності нагрівача веде до підвищення на умовну 1 (що може відповідати певній кількості градусів у фізичній інтерпретації). Відсутність перерегулювання (перевищення понад 1) та нульовий статичний розгін вказують, що модель аперіодична – вона не має коливальної складової і не перевищує цільового рівня. Значення виходу стабілізується точно на рівні K , отже статична похибка відсутня (для такого об'єкта при постійному вході досягнення усталеного режиму відбувається без статичного відхилення).

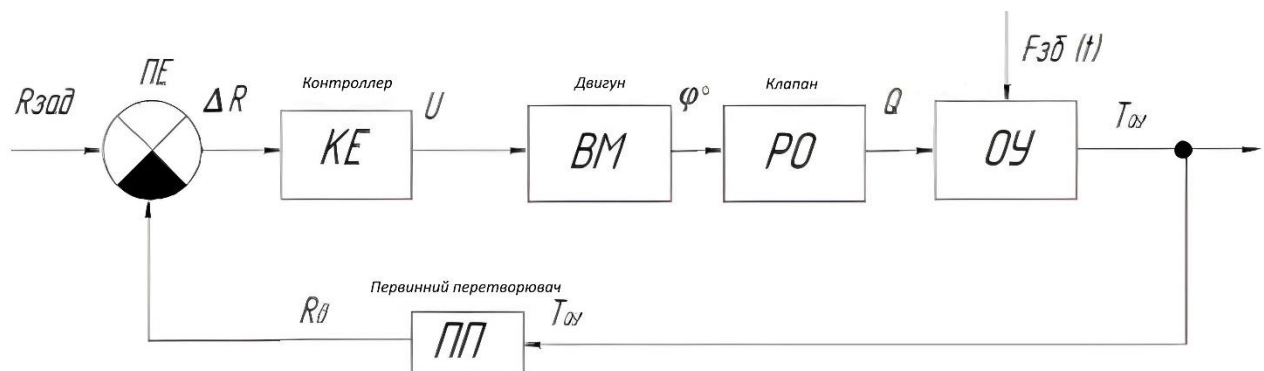
Стійкість системи. Модель теплиці, представлена інерційною ланкою першого порядку, є асимптотично стійкою. Це видно як з аналітичних властивостей передаточної функції (поліус $s = -1/T$ лежить у лівій півплощині для $T > 0$), так і з графіка: після збурення система виходить на новий стабільний рівень і не демонструє ні нескінченного росту, ні коливань. Наявність чистого запізнення τ_d не впливає на внутрішню стійкість об'єкта, але у замкнутій системі керування може ускладнювати забезпечення стійкості (велике τ_d потенційно знижує запас стійкості контуру). Тим не менш, сам по собі об'єкт (теплиця) як теплоємна ланка є стійким – після припинення дії нагрівача температура буде спадати і зрештою повернеться до рівноваги з навколишнім середовищем.

Отримані результати моделювання підтверджують, що обрана математична модель адекватно передає основні риси динаміки промислової теплиці: повільний аперіодичний перехідний процес, значний час затримки і відсутність коливань. Часові показники (затримка, стала часу) можуть коригуватися під конкретний об'єкт, але якісна форма відгуку залишиться подібною до представленої.

РОЗДІЛ 3. ПРОЄКТУВАННЯ СИСТЕМИ АВТОМАТИЧНОГО КЕРУВАННЯ ТЕМПЕРАТУРОЮ ПОВІТРЯ ТЕПЛИЦІ

3.1 Вибір та обґрунтування структури системи керування

Для підтримання стабільної температури повітря в промисловій теплиці пропонується одноконтурна система автоматичного регулювання. **Одноконтурна система** означає, що використовується один вимірюваний параметр (температура повітря) і один регулюючий вплив (нагрів або охолодження) у замкненому контурі керування. Такий підхід є найпростішим і достатнім для контролю температури в одній теплиці, оскільки основний фактор – це температура повітря, яка безпосередньо впливає на ріст рослин. Багатоконтурні чи каскадні системи у цьому випадку не потрібні, бо **температура** може регулюватися автономно, а інші параметри (вологість, CO_2 тощо) за потреби контролюються окремими контурами.



На рис. 3.1 зображено типову структуру одноконтурної системи автоматичного регулювання:

Табл. 3.1 Позначення одноконтурної системи

Позначення	Назва елемента	Функція / Призначення
R_{зад}	Задане значення	Установлюване (бажане) значення параметра, наприклад, температура повітря.
ПЕ	Порівнювальний елемент	Обчислює відхилення $\Delta R = R_{\text{зад}} - R_{\text{ф}}$
КЕ	Керуючий елемент (контролер)	Формує керуючий сигнал UU відповідно до алгоритму (наприклад, ПІ або ПІД).
ВМ	Виконавчий механізм	Перетворює сигнал UU у механічний вплив (електродвигун, сервопривід тощо).
РО	Регулюючий орган	Впливає на фізичний процес (наприклад, відкриває клапан, вмикає нагрівач).
ОУ	Об'єкт управління	Середовище, в якому регулюється параметр (наприклад, повітря в теплиці).
ПП	Первинний перетворювач	Датчик, що вимірює фактичне значення параметра (наприклад, $T_{\text{вих}}$).
R_ф	Фактичне значення	Поточне значення параметра, яке надходить у контур зворотного зв'язку.

Основним елементом контуру обрано **ПІД-регулятор** (пропорційно-інтегрально-диференційний). Вибір ПІД-регулятора обґрунтовується його універсальністю та ефективністю для повільних теплових об'єктів, до яких належать теплиці. По-перше, ПІД-регулятор є стандартним інструментом в системах автоматизації завдяки простоті налаштування та наявності готових програмних блоків у ПЛК та SCADA-системах. По-друге, він забезпечує **відсутність статичної похибки** (за рахунок інтегральної складової) і достатнє швидкодіюче з мінімальним перерегулюванням (завдяки диференційній складовій). Альтернативні алгоритми – такі як двопозиційне (релейне) керування або нечітке регулювання – теж можливі, але ПІД-регулятор обрано через його передбачуваність, надійність та простоту реалізації на промисловому контролері.

Структура системи керування включає такі основні компоненти:

Об'єкт керування: промислова теплиця з системами обігріву і вентиляції. Динаміка теплиці є інерційною: температура повітря змінюється відносно повільно через велику теплову масу і теплоємність середовища. Типово теплиця як об'єкт моделюється як аперіодична ланка 1-го порядку із запізненням (через теплову інерцію та транспортні затримки повітря). Наприклад, дослідження показують, що час запізнення може становити десятки секунд, а стала часу – сотні секунд. Без регулювання система має значну статичну похибку та довгий час встановлення (до 15–20 хвилин), що неприпустимо для підтримання стабільного мікроклімату. Тому потрібен ефективний регулятор, щоб подолати ці проблеми.

Датчик температури (вимірювальний елемент) термометр опору DS18B20. Він забезпечує сигнал зворотного зв'язку – фактичну температуру повітря.

ПІД-регулятор (контролер): обчислює відхилення $e(t) = T_{\text{зад}} - T_{\text{вимір}}$ і формує керуючий вплив $u(t)$ за законом:

$$u(t) = K_P e(t) + K_I \int e(t) dt + K_D \frac{de(t)}{dt}.$$

Регулятор може бути реалізований програмно всередині ПЛК або як окремий модуль. В нашому випадку він буде реалізований програмно на контролері Arduino MEGA

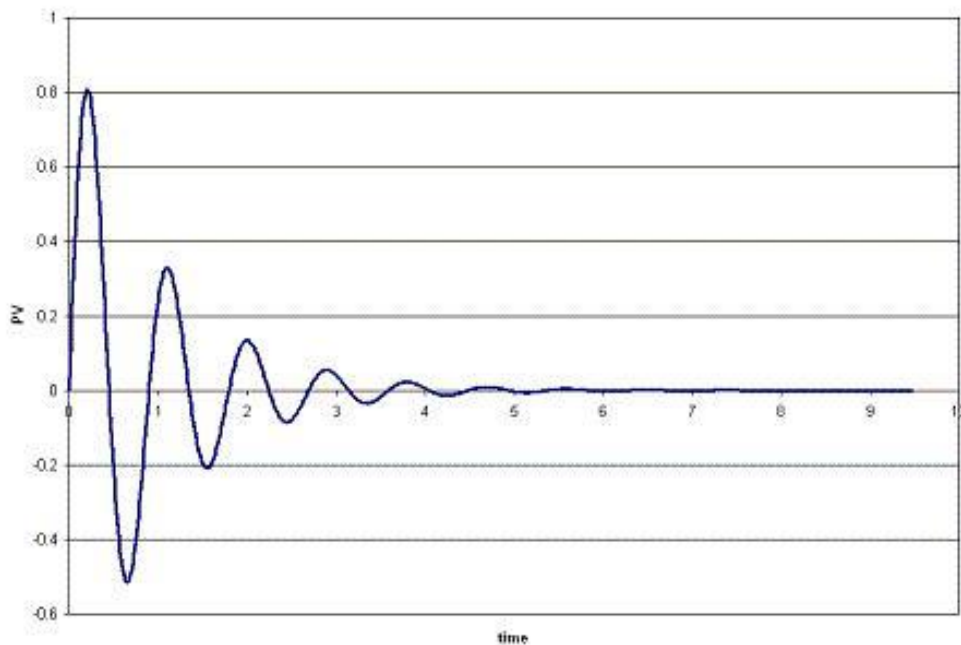
Виконавчі механізми (актуатори) для нагріву та охолодження: **нагрівач** електричний ТЕН та **вентиляційні фрамуги/вентилятори** для охолодження. У одноконтурній схемі реалізовано **роздільне керування (split-range)**: один регулятор керує двома типами впливу – якщо є недогрів (температура нижче заданої), збільшується подача тепла; якщо перегрів (вище заданої) – активується вентиляція. Таким чином, знак або діапазон вихідного сигналу регулятора визначає, який механізм задіяно. Наприклад, при $u > 0$ – працює нагрівач, при $u < 0$ – відкриваються фрамуги для охолодження. У межах нуля регулятор може не задіювати жоден механізм, підтримуючи температуру пасивно.

Вхідні та вихідні змінні системи: контрольованою змінною (вихідною) є температура повітря T в теплиці, яку ми хочемо підтримувати. Вхідними впливами на об'єкт є теплова потужність нагрівача Q_h та інтенсивність охолодження Q_c (через вентиляцію). Обидва ці впливи визначаються одним регулюючим сигналом $u(t)$ ПІД-регулятора: позитивне u інтерпретується як потужність нагріву, а від'ємне – як ступінь відкриття вентиляційних фрамуг. Завдана температура $T_{\text{зад}}$ служить вхідною змінною для контуру керування. До збурень, що впливають на систему, належать зовнішня температура повітря, сонячна радіація (нагрів від сонця), вітер, тепловиділення від рослин тощо. Система повинна реагувати на збурення автоматично, підтримуючи задану температуру.

Отже, обрана одноконтурна система з ПД-регулятором дозволяє автоматично підтримувати мікроклімат теплиці. Ця структура є виправданою через відносну повільність процесу та необхідність усунення статичної похибки.

3.2 Синтез ПД-регулятора (розрахунок параметрів та моделювання)

Синтез ПД-регулятора полягає у виборі оптимальних коефіцієнтів K_P , T_I та T_D (пропорційного, інтегрального та диференційного налаштувань) для забезпечення потрібної якості перехідного процесу. У даному випадку обрано **метод часової характеристики** об'єкта (метод реакції на ступінчастий вплив) для первинного налаштування, відомий також як **метод Зіглера–Нікольса відкритого контуру**.



На рис. 3.2 зображено метод Зіглера–Нікольса відкритого контуру

Суть методу: виконують розімкнутий експеримент – подають на об'єкт одиничний ступінчастий вплив (наприклад, вмикають нагрівач на певну потужність) і реєструють перехідну характеристику температури (реакцію теплиці). За отриманою S-подібною кривою визначають **мертвий час** τ_{dead} (запізнювання початку реакції) і **постійну часу** об'єкта τ (час наростання) та коефіцієнт підсилення об'єкта K_{obj} . Ці параметри підставляють у емпіричні формули Зіглера–Нікольса для розрахунку коефіцієнтів регулятора.

Для ПІД-регулятора класичні налаштування за Зіглером–Нікольсом (відкритий контур) такі:

Табл. 3.2 класичні налаштування за Зіглером–Нікольсом

	K_c	T_i	T_d
P	K_0		
PI	$0.9K_0$	$3.3\tau_{dead}$	
PID	$1.2K_0$	$2\tau_{dead}$	$0.5\tau_{dead}$

де τ – постійна часу об'єкта, τ_{dead} – мертвий час (затримка).

Отримані значення служать початковою оцінкою параметрів регулятора. В нашому випадку, за даними літератури для типової теплиці: $\tau \approx 213.9s$, $\tau_{dead} \approx 120.5s$. Припустивши коефіцієнт передачі об'єкта $K_{obj} \approx 1$, за формулами отримаємо початкові налаштування:

$$K_P \approx 1.2 * \frac{213.9}{120.5} \approx 2.13$$

$$T_I \approx 2 \cdot 120.5 \approx 241s$$

$$T_D \approx 0.5 \cdot 120.5 \approx 60s$$

Після цього виконано уточнення налаштувань шляхом імітаційного моделювання та за необхідності – корекції за методами частоти коливань (другий метод Зіглера–Нікольса). Другий метод (метод критичного коефіцієнта підсилення) полягає у приведенні замкненої системи на межу стійкості (інтеграл та диференціатор відключені), знаходженні критичного коефіцієнта $K_{кр}$ та періоду автоколивань $T_{кр}$, і обчисленні за емпіричними формулами:

$$K_P = 0.6, \quad T_I = 0.5, \quad T_D = 0.125$$

Цей метод у даному проєкті використовувався для перевірки, але основні налаштування отримано за реакцією процесу.

Моделювання системи здійснено у середовищі MATLAB/Simulink. Об'єкт (теплиця) змодельовано як аперіодична ланка 1-го порядку з транспортним запізненням:

$$W_{\text{obj}}(s) = \frac{K_{\text{obj}}e^{-Ls}}{\tau s + 1}$$

де $L = \tau_{\text{dead}}$ – запізнення, τ – стала часу. Для заданих параметрів ($K_{\text{obj}} = 1$, $\tau = 200$ с, $L = 100$ с, як приклад близький до реальних значень) було змодельовано роботу замкненого контуру з ПІД-регулятором. На рис. 3.3 показано результат моделювання перехідного процесу при зміні температури заданої з 0 до 1 (умовних одиниць)

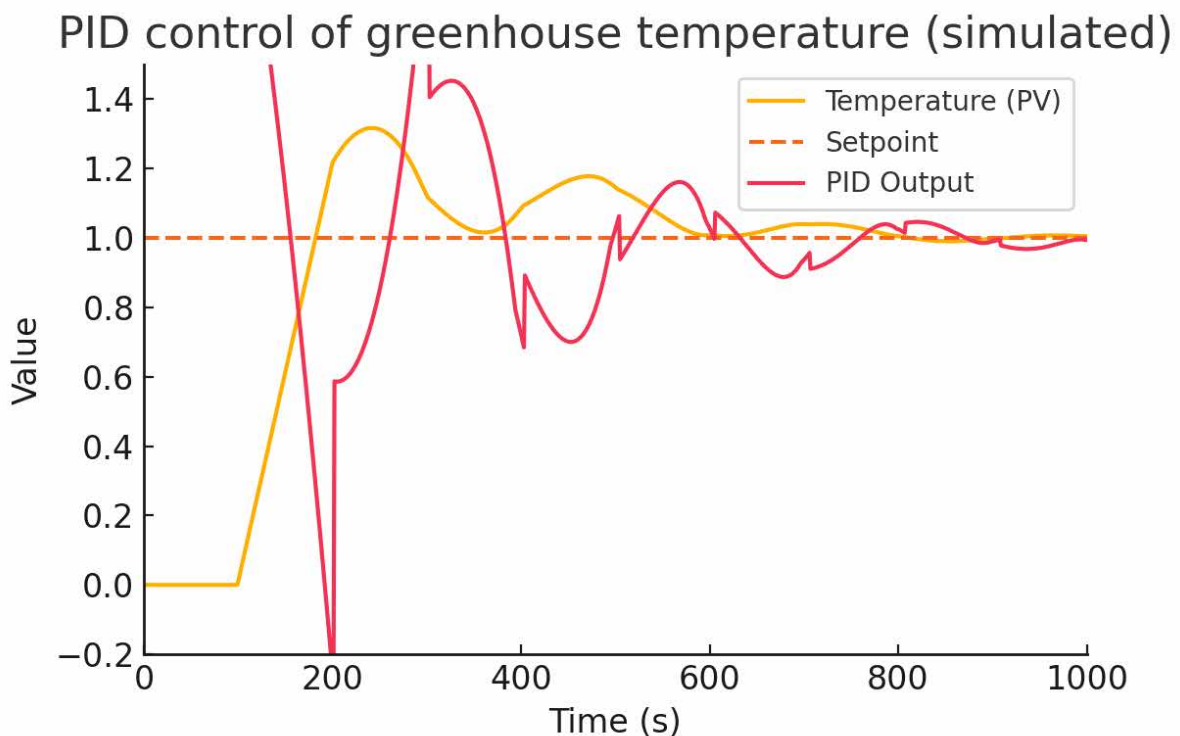


Рис. 3.3 Результат моделювання перехідного процесу при зміні температури

3.3 Реалізація алгоритму у автоматизованій системі керування мікрокліматом теплиці

Вибір плати Arduino для теплиці

Для стабільної роботи контролера в умовах промислової теплиці важливо підібрати плату з достатніми ресурсами та інтерфейсами. Серед розглянутих популярних варіантів Arduino обрано:

Arduino Mega 2560 Rev3 — це потужна мікроконтролерна плата на базі чіпа ATmega2560, призначена для складних проєктів, які потребують великої кількості входів/виходів та обчислювальних ресурсів.

- ❖ Мікроконтролер: ATmega2560
- ❖ Робоча напруга: 5 В
- ❖ Вхідна напруга (рекомендована): 7–12 В
- ❖ Цифрові входи/виходи: 54 (з них 15 підтримують PWM)
- ❖ Аналогові входи: 16
- ❖ Пам'ять Flash: 256 КВ (8 КВ використовується завантажувачем)
- ❖ ОЗП (SRAM): 8 КВ
- ❖ EEPROM: 4 КВ
- ❖ Тактова частота: 16 МГц
- ❖ Інтерфейси що підтримуються: 4 UART, I²C, SPI, USB
- ❖ Розміри: 101.52 мм × 53.3 мм
- ❖ Вага: 37 г

Переваги

- ✓ Велика кількість пінів: Ідеально підходить для проєктів з багатьма датчиками та виконавчими пристроями.
- ✓ Багато пам'яті: Достатньо для складних програм та обробки великих обсягів даних.
- ✓ Розширені комунікаційні можливості: 4 апаратні UART-порти дозволяють одночасно підключати кілька пристроїв зв'язку, таких як ESP8266, GSM-модулі тощо.
- ✓ Сумісність з більшістю шилдів: Підтримує багато розширень, розроблених для Arduino Mega та інших плат.

Arduino Mega 2560 – містить **54 цифрових входи/виходи (14 з підтримкою PWM)** та **16 аналогових входів** і працює на чіпі ATmega2560. Mega забезпечує набагато більше портів і пам'яті, що корисно для підключення множинних датчиків і реле. Наприклад, в одному проєкті автоматизації теплиці було задіяно 21 цифровий та 7 аналогових пінів Mega для всіх датчиків і пристроїв, залишивши запас для майбутнього масштабування. Така плата добре зарекомендувала себе завдяки доступній ціні, швидкості опитування входів і сумісності з багатьма модулями.

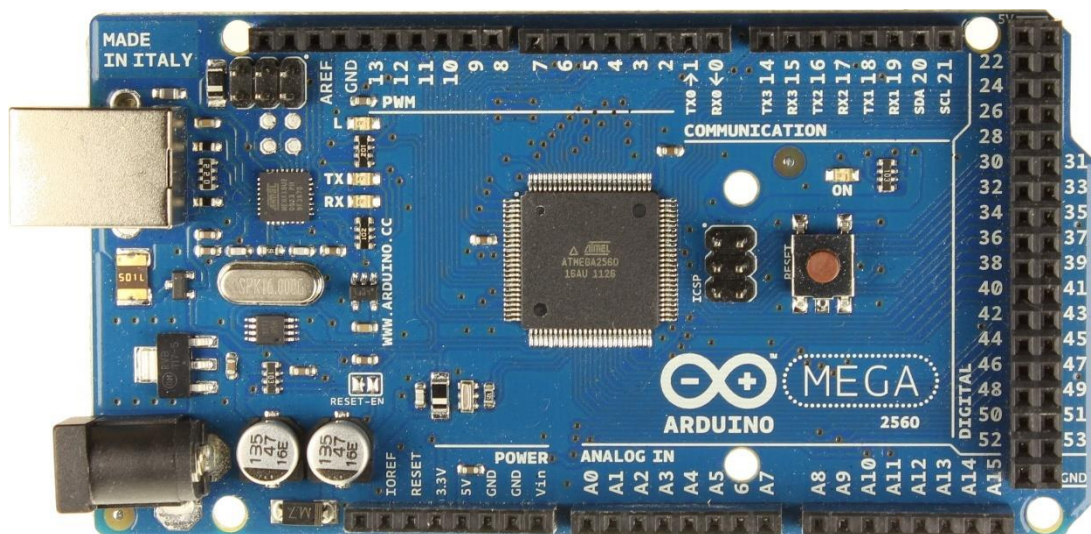


Рис 3.3 Arduino Mega 2560

Arduino Mega 2560 Rev3 є відмінним вибором для проєктів автоматизації, таких як системи керування мікрокліматом теплиць, де необхідно обробляти дані з кількох датчиків та керувати різними виконавчими механізмами. Для промислової теплиці, де середовище може бути вологим і температурно нестабільним, важливо розмістити контролер у захищеному корпусі.

Датчик температури DS18B20: підключення та зчитування

DS18B20 – цифровий датчик температури з інтерфейсом 1-Wire, який ідеально підходить для тепличних проєктів завдяки своїй точності ($\pm 0,5^{\circ}\text{C}$) та можливості використання довгих зондових проводів.



Рис. 3.4 Цифровий датчик температури **DS18B20**

Підключення DS18B20 до Arduino здійснюється лише по **трьох провідниках**: лівий контакт датчика з'єднується з землею (GND), правий – з живленням (може бути +5 В від Arduino або +3,3 В для сумісності з ESP-платами), а середній контакт – це лінія даних (Data), яка підключається до цифрового входу Arduino. Обов'язково потрібен **підтягувальний резистор $\sim 4,7$ к Ω** між лінією Data та Vcc для забезпечення коректного обміну даними по шині 1-Wire. На практиці датчик можна під'єднати без пайки через невелику макетну плату: нижче показано приклад з Arduino Mega (через Ethernet Shield) та датчиком DS18B20 на макетці з резистором 4,7 к Ω між жовтим дротом (Data) і червоним (Vcc):

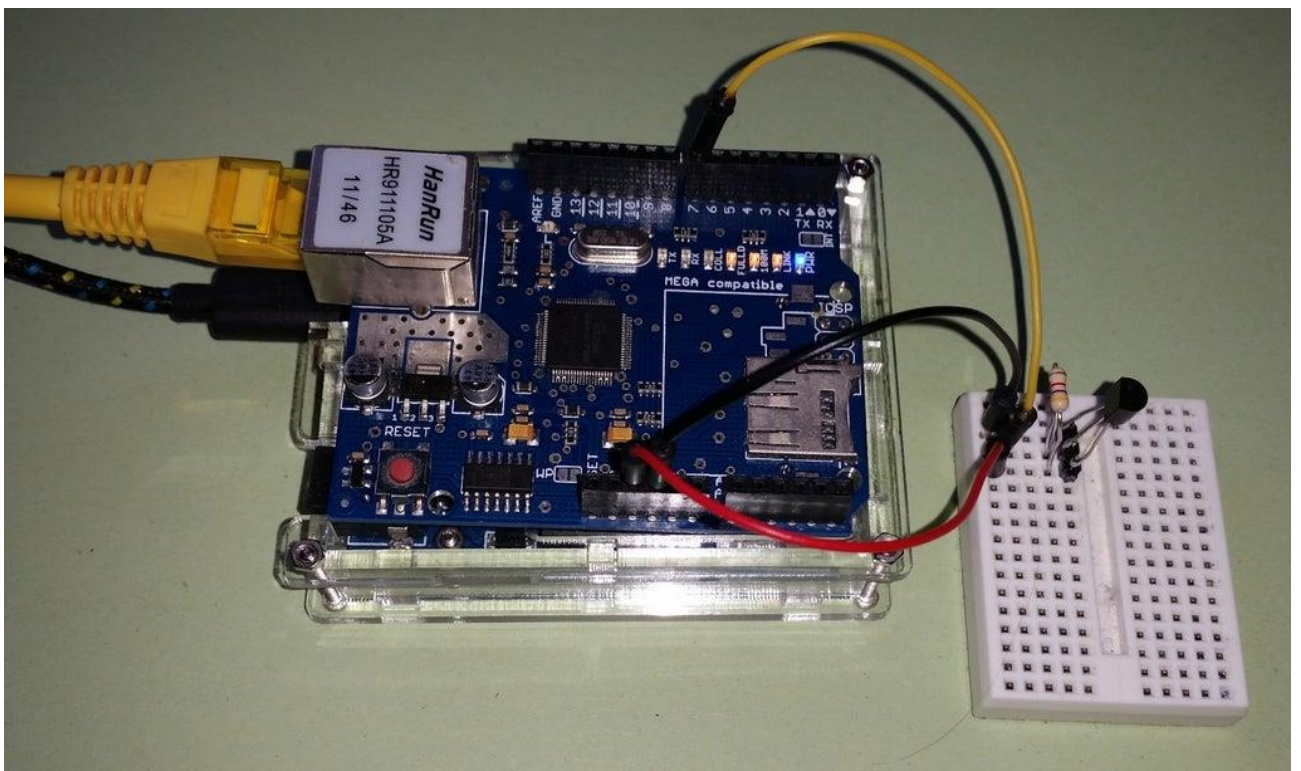
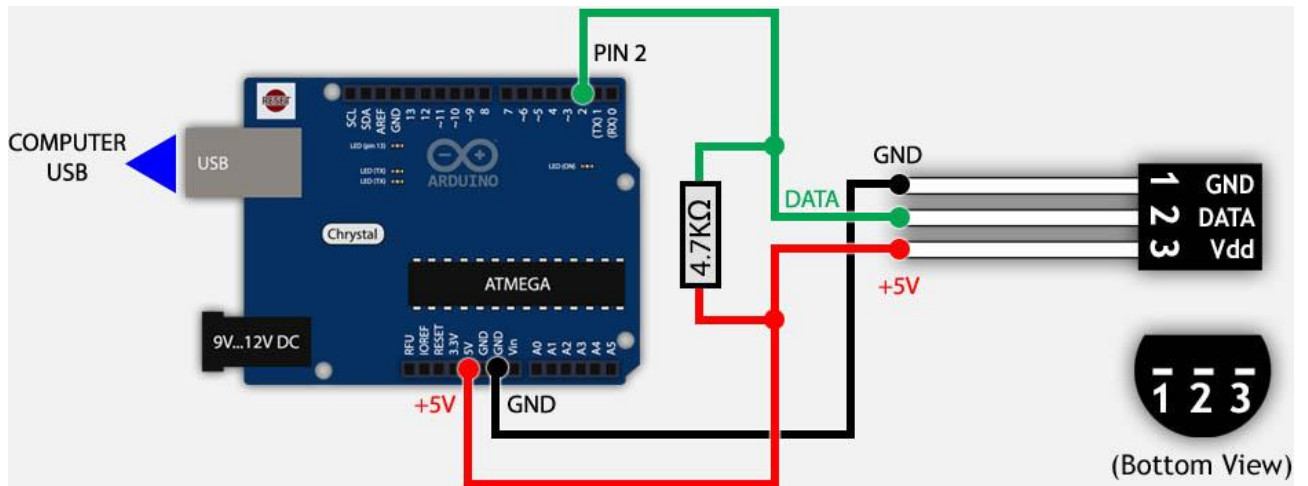


Рис. 3.5.1 та 3.5.2 Підключення DS18B20 до Arduino Mega

Програмне опрацювання DS18B20 здійснюється за допомогою спеціальних бібліотек. Arduino-скетч має включати бібліотеку **OneWire** (для низькорівневого обміну по 1-Wire) та **DallasTemperature** (високорівневий API для зчитування температур).

Після підключення бібліотек і ініціалізації шини (вказавши номер піна, до якого під'єднано Data), можна опитувати датчик викликом методів типу `sensors.requestTemperatures()` і `sensors.getTempCByIndex(0)` – вони повернуть температуру в градусах. Бібліотека `DallasTemperature` автоматично обробляє затримки та обчислення контрольної суми, тож зчитувати показники можна, наприклад, кожні 1–10 секунд у циклі `loop()`. Отримані значення температури використовуються далі логікою контролера для прийняття рішень (включення нагрівача чи вентилятора).

Керування нагрівачем і вентиляцією (режим `split-range`)

У теплиці для підтримання мікроклімату зазвичай встановлено два протилежно діючі виконавчі механізми: **нагрівач** (підвищує температуру) та **вентиляційний вентилятор** або кватирка (знижує температуру за рахунок охолодження повітря). Щоб ефективно керувати температурою і уникнути ситуації, коли нагрів і охолодження працюють одночасно, застосовують стратегію **роздільного діапазону (`split-range`)** або інші оптимальні алгоритми регулювання.

Принцип `split-range`: один регулятор (наприклад, ПІД-регулятор температури) видає вихідний сигнал 0–100%, який поділено між двома пристроями. Умовно, **0–50% виходу відповідає роботі охолодження, а 50–100% – роботі нагріву**. При цьому на середині діапазону (близько 50%) додають зону нечутливості, щоб уникнути частого перемикання режимів. Наприклад, можна задати, що вентилятор повністю вимкнений при сигналі <49%, а нагрівач вмикається лише при >51%. Така **“мертва зона” в 2%** гарантує, що біля точки рівноваги система не буде одночасно вмикати то охолодження, то нагрів, викликаючи коливання температури.

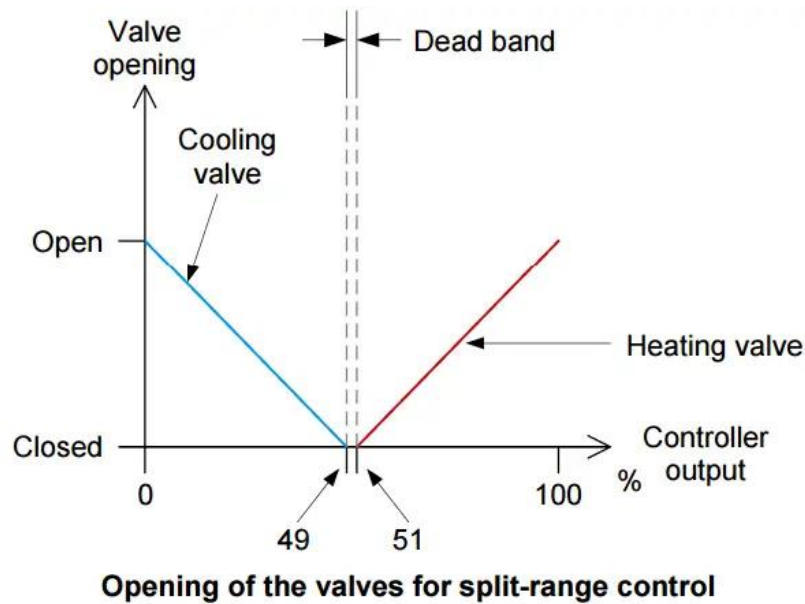


Рис. 3.6 Спрощений двопозиційний контроль з гістерезисом

На практиці в Arduino-проєктах часто реалізують **спрощений двопозиційний контроль з гістерезисом**, який є приватним випадком split-range. Суть його в тому, що задаються дві порогові температури: нижній поріг (для нагріву) і верхній поріг (для охолодження). Коли температура опускається до нижнього порогу або нижче – вмикається нагрівач, і працює, доки температура не підніметься трохи вище цього порогу; коли ж температура піднімається до верхнього порогу або вище – запускається вентиляція/вентилятор, доки температура не впаде нижче цього значення. Важливо зробити **розрив між порогами** (наприклад, різниця 2 °C), щоб був гістерезис. Таким чином, між зонами нагріву і охолодження є нейтральний діапазон, де система нічого не вмикає – це запобігає частому перемиканню реле.

Реальний приклад: у проєкті на Arduino через Blynk було налаштовано **мінімальну та максимальну температуру** як налаштовувані параметри. Якщо фактична температура перевищує встановлений максимум, контролер автоматично вмикає витяжний вентилятор – причому швидкість вентилятора збільшується (через PWM) чим більше температура перевищує поріг. Якщо ж температура опускається нижче мінімального порогу – увімкнеться електричний

нагрівач, який працюватиме, поки температура не стане на 1 °C вище порогового значення (гістерезис 2 °C). Така логіка фактично розділяє контроль: **вище норми – вентилюємо, нижче норми – гріємо**, і не дає системі одночасно нагрівати й охолоджувати.

Звісно, можна реалізувати і **плавне PID-регулювання** з двома виходами, або навіть нечітке керування. Але для теплиці, яка є інерційним об'єктом (температура змінюється повільно), **релейного алгоритму з гістерезисом зазвичай достатньо** для підтримання стабільної. В академічних дослідженнях радять використовувати PID через його універсальність і відсутність статичної похибки, проте на практиці багато DIY-рішень обходяться простими двопороговими схемами. Головне – правильно обрати величину мертвої зони, щоб уникнути частого вмикання/вимикання нагрівача та вентилятора, і забезпечити достатній запас потужності цих пристроїв (нагрівач повинен встигати прогріти повітря, а вентилятор – ефективно охолоджувати).

РОЗДІЛ 4. РОЗРОБКА ЦИФРОВОЇ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ

4.1 Інтерфейс моніторингу та керування в Blynk

Для зручного контролю за мікрокліматом та віддаленого керування обладнанням використовують мобільні застосунки IoT. Платформа **Blynk** – один з найпопулярніших варіантів, що надає готовий інтерфейс для смартфона (iOS/Android) з набором віджетів (графіки, індикатори, кнопки тощо) і працює через інтернет. Arduino під'єднується до хмарного сервера Blynk через мережевий модуль (Wi-Fi, Ethernet або GSM) і обмінюється даними з додатком.

Написаний код для керування мікрокліматом за допомогою Arduino – Додаток 1

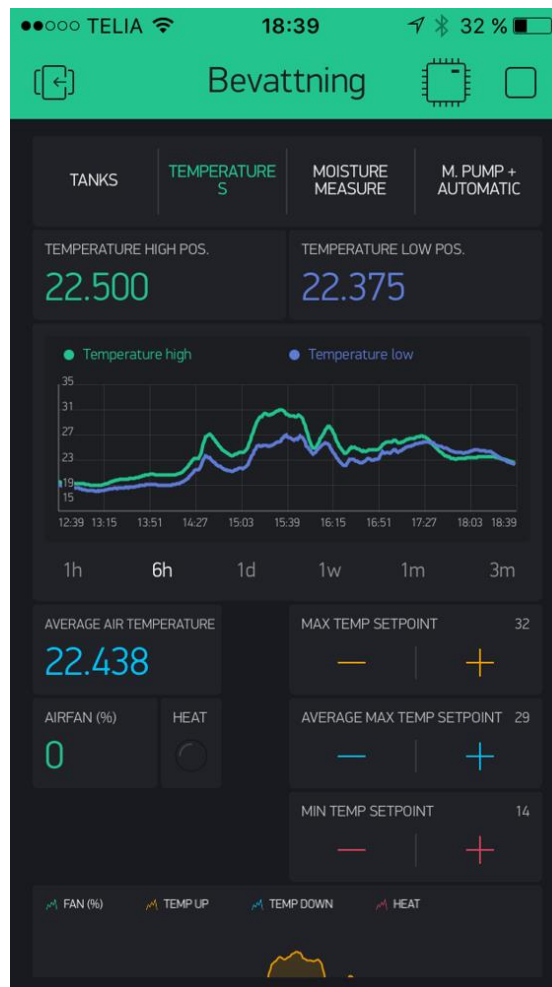


Рис. 4.1 Екран моніторингу температури в застосунку Blynk для теплиці.

Відображаються актуальні показники з двох датчиків DS18B20 (Temperature high/low), графік зміни температур за 6 годин, середня температура, а також встановлені пороги: Max temp setpoint (гранично допустима верхня температура) і Min temp setpoint (мінімально допустима). Показано, що вентилятор (AirFan) наразі вимкнений (0%), нагрів (Heat) – також викл. На вкладках зверху можна перемикатися між іншими екранами.

Як видно з прикладу інтерфейсу, Blynk дозволяє **в реальному часі** спостерігати за показниками сенсорів і історією (графіки за години/дні) та змінювати налаштування. У проєкті на скриншоті через Blynk передавались середні та поточні температури повітря, відсоток потужності вентилятора і стан нагрівача, а користувач мав змогу задати граничні температури і перемикати режими (ручний/авто). Всі ці дані й команди йдуть через **віртуальні піни Blynk** до контролера: наприклад, температура може передаватися у віджет “Gauge” чи “History Graph”, а кнопки “Heater Auto” або повзунок швидкості вентилятора – надсилати значення на Arduino, де виконується відповідний код керування.

Способи підключення Blynk до Arduino: найпростіше – використати плату з вбудованим інтернет-модулем. Так, у випадку ESP32 або ESP8266 безпосередньо підключається контролер до Wi-Fi і використовується бібліотека Blynk для відправлення даних. Обрано ArduinoMega, до якого можна додати **ESP8266 Wi-Fi модуль** або **Ethernet Shield**. У скетчі достатньо вказати токен автентифікації Blynk, налаштувати з’єднання (WiFi.begin або Ethernet.begin) і періодично викликати Blynk.virtualWrite() з потрібними значеннями датчиків. Blynk-сервер (хмарний або локальний) приймає ці дані і оновлює віджети на телефоні.

4.2 Реалізація системи керуванням мікрокліматом з Arduino

Arduino-керована теплиця з інтерфейсом Blynk: Використано плату Arduino Mega 2560, до якої підключено два цифрові термодатчики DS18B20 – один під стелею теплиці, другий близько до ґрунту. Контролер опитує датчики кожні ~10 секунд і приймає рішення: **якщо температура перевищує встановлену межу**, вмикається витяжний вентилятор для охолодження (продувки) приміщення; **якщо ж стає надто холодно**, вмикається електричний нагрівач, щоб підняти температуру. У схемі реалізовано пропорційне керування вентилятором – при невеликому перегріві він може працювати на малій швидкості, а при сильному перегріві – на повну (PWM-керування швидкістю залежно від різниці між фактичною температурою та заданою). Нагрівач же працює в двопозиційному режимі з гістерезисом: він вмикається, коли температура опустилась нижче мінімуму, і відключається, щойно температура піднялась на 1°C вище точки спрацювання. Такий підхід запобігає частому миготінню нагрівача та забезпечує більш стабільний контроль.

Через додаток **Blynk** можна встановити бажані пороги температур (наприклад, мінімум +18°C, максимум +25°C) і можна відстежувати поточні показники. На екрані смартфона відображаються обидві температури (верхній та нижній датчики), а також індикатор стану: контролер показує, коли вентилятор увімкнений і з якою інтенсивністю (%), та коли нагрів активовано.

РОЗДІЛ 5: СХЕМИ СИСТЕМИ АВТОМАТИЗАЦІЇ

5.1 Принципова електрична схема

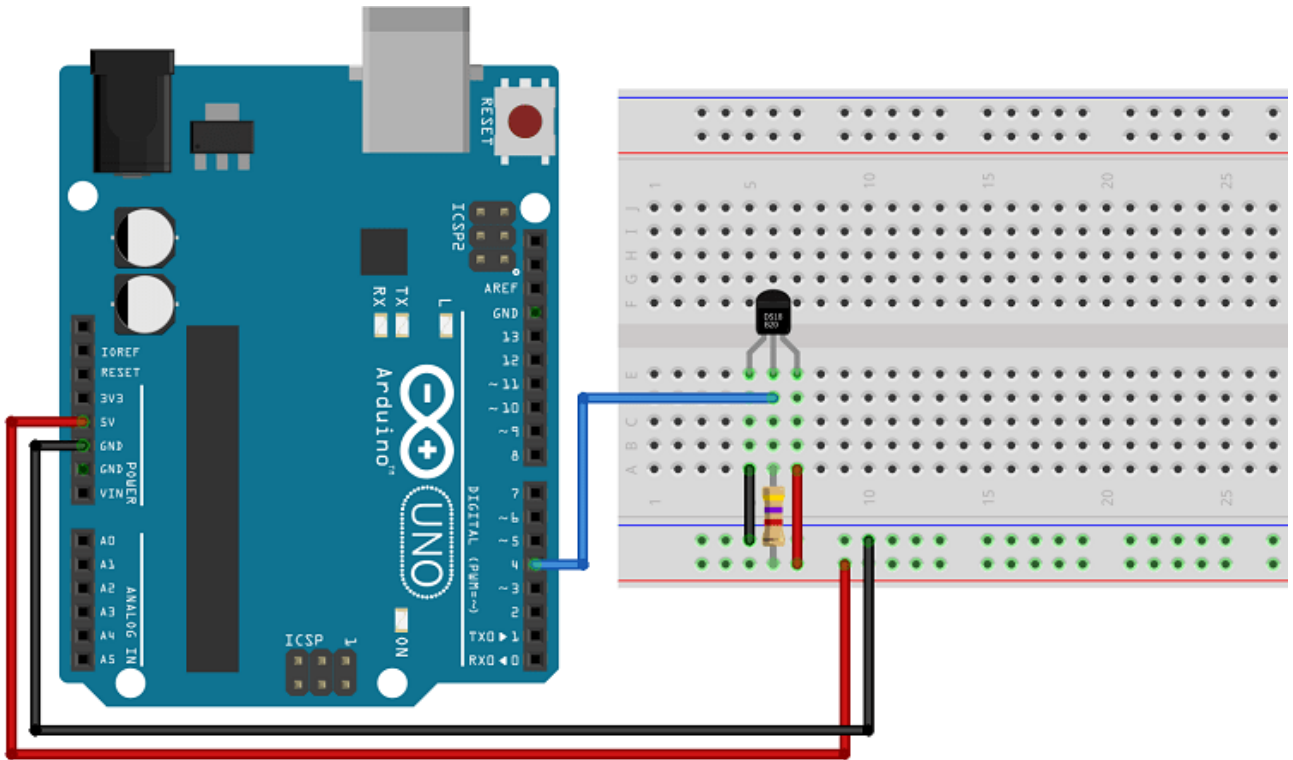


Рис. 5.1 Приклад принципової схеми підключення цифрового датчика температури DS18B20 до Arduino та модуля.

Принципова схема показує конкретні електричні з'єднання. Наприклад, цифровий датчик DS18B20 підключається до одного з цифрових входів Arduino через провід даних (DQ) з резистором-підтягуванням 4,7 кОм до лінії +5 В. При цьому на DS18B20 GND йде на загальну «землю» системи, а VDD – на +5 В блоку живлення. Таким чином датчик працює в нормальному трьохпровідовому режимі.

Виходи Arduino живляться 5 В через внутрішній стабілізатор або зовнішній адаптер, і їхні цифрові сигнали йдуть на входи IN модулів реле чи драйверів навантаження. При отриманні сигналу керуючий транзистор у модулі реле спрацьовує і перемикає високовольтний ланцюг: на контакти COM–NO подається живлення нагрівача або вентилятора. Наприклад, для нагрівника

використовується 220 В мережі, що через контакт реле подається на нагрівний елемент; вентилятор може живитися 12 В через відповідне реле або драйвер. Мотор фрамуги під'єднується через Н-міст або комутацію полярності (два реле): подача живлення в одну сторону відкриває фрамугу, а в зворотню – закриває її. Комунікація з мобільним додатком реалізована за допомогою модуля Wi-Fi ESP8266 або Ethernet-шита. Модуль ESP8266 підключається до UART Arduino (TXD↔RX, GND↔GND), а вивід CH_PD повинний бути піднятий на 3.3/5 В живлення (зазвичай через стабілізатор).

5.2 Схема з'єднань

На схемі з'єднань показано фактичні провідні з'єднання між компонентами.

Живлення. Головне джерело (220 В від мережі або 12 В) перетворюється на потрібні напруги – +5 В для Arduino та модулів (через адаптер/стабілізатор) і 12/220 В для навантажень (подаються на реле). Усі «землі» (GND) Arduino, датчиків, модулів реле та інших вузлів об'єднуються в загальну шину.

Arduino та датчики. Живлення +5 В подано на відповідний вхід плати Arduino і на VCC модулів (GPIO, реле). DS18B20 має GND→GND, VDD→+5 В, DATA→ цифровий вихід (наприклад, D4) через підтяжний резистор 4,7 кОм до +5 В.

Реле та виходи. Виходи Arduino D* (порт IN1/IN2 на модулі реле) під'єднуються до сигнальних входів реле; VCC реле – до +5 В, GND реле – до GND. На силовій частині реле: навантаження (нагрівач, вентилятор) підключається між джерелом живлення і контактами COM–NO (звичайно відкритий режим). Фрамуга під'єднується аналогічно через реверсивний драйвер. Якщо використовується Ethernet-модуль, то провід ETH підключається до SPI-інтерфейсу Arduino. Модуль ESP8266 з'єднується послідовно: TX ESP8266 → RX Arduino (Serial1), RX ESP8266 → TX Arduino, GND→GND.

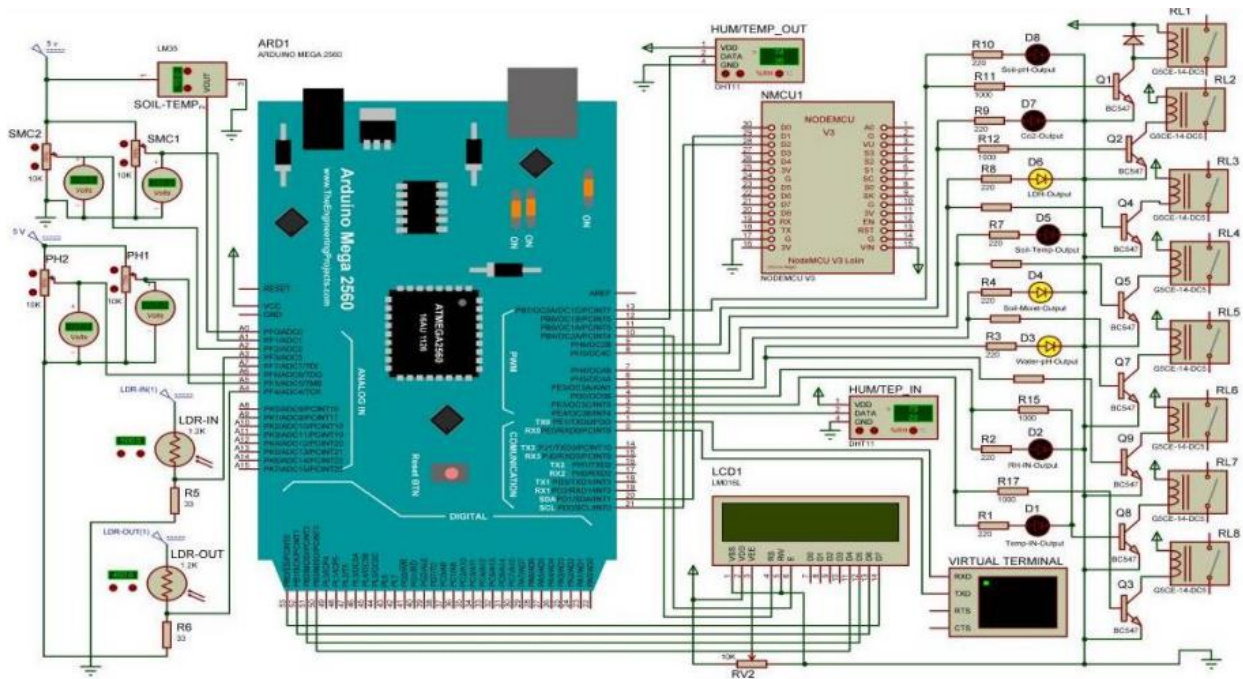


Рис. 5.2 Схема з'єднань елементів керування мікроклімату теплиці в одну цілу систему

5.3 Монтажна схема

Монтажна схема демонструє розташування та механічний монтаж усіх елементів системи на щиті чи корпусі контролера. Тут показані плата Arduino Mega, модулі реле та живлення, а також клеми підключення зовнішніх ліній живлення і датчиків. Наприклад, +5 В від адаптера розгалужується на відповідні клеми живлення модулів, а +220 В мережі підводиться на загальні контакти COM реле. Фаза та нуль розведені по клемниках до виходів на нагрівач і вентилятор через реле; виходи сигналів Arduino зведені до плат керування. Датчик DS18B20 встановлюється зовні (у захисті) і до нього проведено три дроти до плати контролера. Така схема монтажу забезпечує зручність обслуговування – усі кабелі з'єднані через клеми, а основні плати компактно розміщені на DIN-рейці або в корпусі. Це дозволяє безпечно розвести живлення та сигнали і спрощує подальше технічне обслуговування системи.

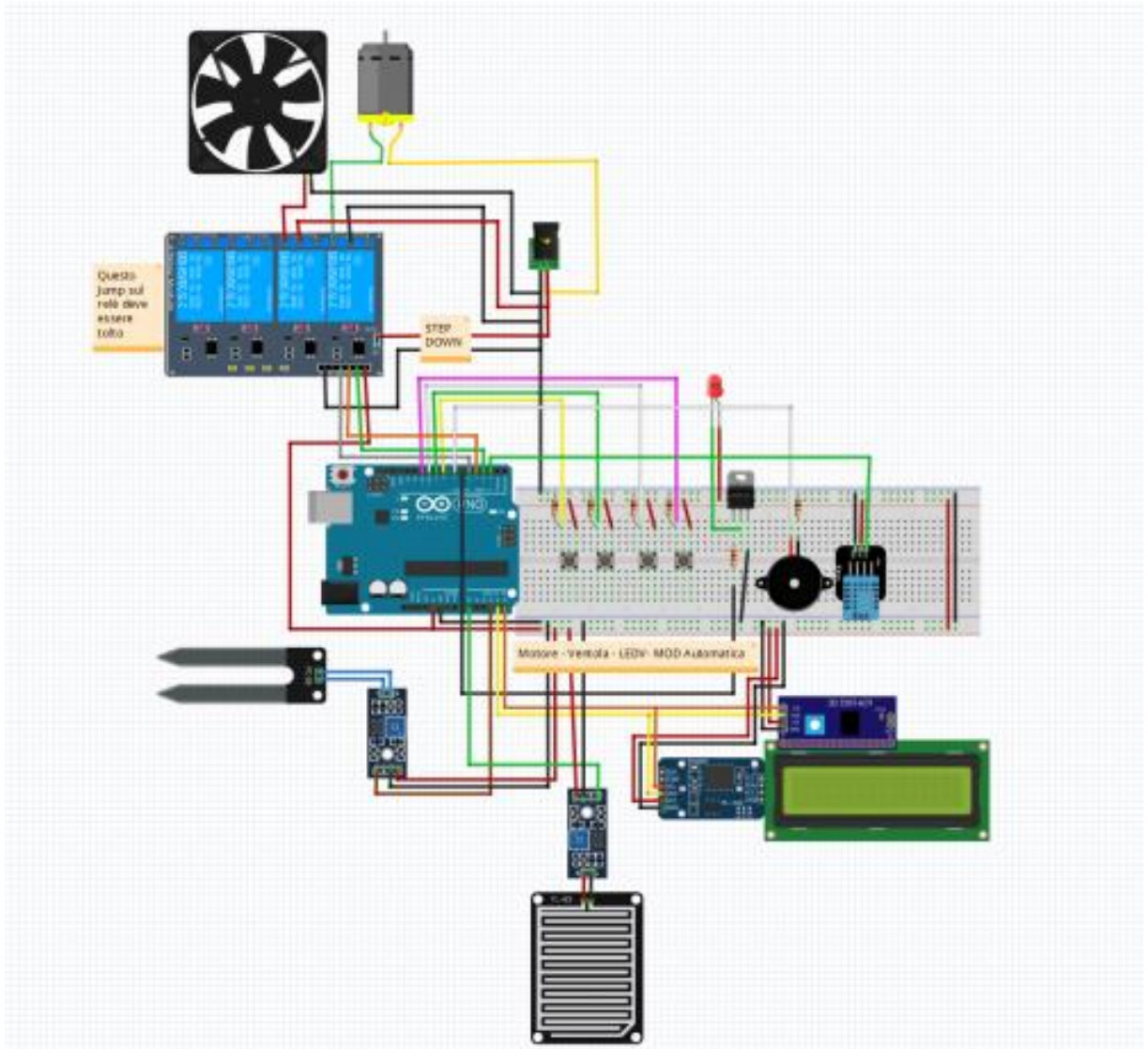


Рис. 5.3 Монтажна схема системи автоматичного керування мікроклімату в теплиці

Автомат на кожен пристрій

Таблиця 5.3. Розподіл пристроїв та відповідних автоматів до них

Пристрій	Автомат	Тип автомата	Характеристика
Нагрівач	C(32 A)	1-полюсний	C (пусковий струм помірний)
Вентилятор	C(4 A)	1-полюсний	C
Фрамуга	C(2 A)	1-полюсний	C

Переваги:

- Точковий захист кожної лінії
- Простота діагностики несправностей
- Легкість в обслуговуванні

Schneider Electric Acti9 iC60N C32A (A9F18332)



Рис 5.3 Автоматичний вимикач Schneider Electric Acti9 iC60N

Основні характеристики:

- ❖ Тип: Автоматичний вимикач (МСВ)
- ❖ Серія: Acti9 iC60N
- ❖ Номінальний струм: 32 А
- ❖ Характеристика спрацювання: тип С (для навантажень з помірним пусковим струмом, як ТЕНи)
- ❖ Кількість полюсів: 1Р або 2Р (залежно від схеми)
- ❖ Комуруюча здатність: 6 000 А (IEC 60947-2)

Переваги:

- ✓ Висока надійність і довговічність
- ✓ Простота монтажу на DIN-рейку
- ✓ Сертифікований по IEC/EN 60898-1
- ✓ Має індикатор стану (ON/OFF)

Таблиця 5.4 Логіка спрацювання автоматичного вимикача типу С

Струм (у кратності від номіналу I_n)	Тип спрацювання	Час спрацювання
$1.13 \times I_n$	Не спрацює	> 1 година
$1.45 \times I_n$	Може спрацювати	≤ 1 година
$2.55 \times I_n$	Повинно спрацювати	≤ 1 секунда
$5...10 \times I_n$	Миттєве спрацювання	0.01...0.1 секунди (10–100 мс)

5.4 Вибір проводів та кабелів

При виборі перерізів живильних проводів керуються допустимими струмами навантаження і умовами прокладки. Згідно з ПУЕ, для відкритої прокладки мідний провід 1,5 мм² витримує до ≈ 23 А (відповідає потужності до ~ 5 кВт при 220 В), а прихована прокладка знижує цей показник. Приклад таких значень наведено в Таблиці 5.5.

Таблиця 5.5 Допустимі струми для мідних проводів за різних умов прокладки (дані за ПУЕ).

Перетин жилі, мм ²	I _{ном} (А) – відкрита прокладка (220 В)	I _{ном} (А) – прихована прокладка (220 В)
0,75	15	–
1,0	17	14
1,5	23	17
2,5	30	21
4,0	41	27

З Таблиці видно, що найпоширеніший кабель 1,5 мм² здатний безпечно проводити до ~ 23 А при відкритій прокладці. Саме тому для стандартного побутового кола 16 А рекомендовано застосовувати провід 1,5 мм². Більшої міцності вимагають головні живильні лінії та ділянки з високими струмами: для них слід підбирати провід 2,5 мм² (до 30 А) або більше (див. табл.5.3). При цьому завжди необхідно перевірити падіння напруги на проводі на заданій довжині та забезпечити запас по нагріванню (температура навколишнього середовища, групова прокладка). Зазвичай у теплиці дроти проводяться у захисних трубах або кабель-каналах через підвищену вологість, тому значення току в табл.5.5 для прихованої прокладки слід вважати орієнтовними.

РОЗДІЛ 6. АНАЛІЗ НАДІЙНОСТІ СИСТЕМИ АВТОМАТИЧНОГО КЕРУВАННЯ МІКРОКЛІМАТОМ ТЕПЛИЦІ ТА ЙОГО ТЕХНІКОЕКОНОМІЧНЕ ОБГРУНТУВАННЯ

6.1. Теоретичні положення щодо надійності

Під надійністю автоматизованої системи розуміють її здатність виконувати задані функції протягом встановленого часу без відмов в умовах заданого середовища. Основними показниками надійності є:

- Інтенсивність відмов (λ), [1/год]
- Середній час безвідмовної роботи (T_{cp})
- Ймовірність безвідмовної роботи $P(t)$

Для систем, що підпорядковуються потоку відмов із постійною інтенсивністю, ймовірність безвідмовної роботи розраховується за формулою:

$$P(t) = e^{-\lambda t}$$

де: λ — інтенсивність відмов ($\lambda = 1 / T_{cp}$), t — час роботи системи

6.2. Оцінка надійності основних елементів системи

Система керування мікрокліматом побудована на базі таких елементів:

Таблиця 6.1 — Основні елементи та їхній середній час безвідмовної роботи.

№	Компонент	Позначення	$T_{\text{ср}}$ (год)	λ (1/год)
1	Контролер Arduino Mega	К1	50 000	$2 \cdot 10^{-5}$
2	Датчик DS18B20	К2	100 000	$1 \cdot 10^{-5}$
3	Модуль реле (нагрівач)	К3	20 000	$5 \cdot 10^{-5}$
4	Модуль реле (вентилятор)	К4	20 000	$5 \cdot 10^{-5}$
5	Модуль реле (фрамуга)	К5	20 000	$5 \cdot 10^{-5}$
6	Wi-Fi ESP8266	К6	30 000	$3.3 \cdot 10^{-5}$
7	Живлення (адаптер)	К7	40 000	$2.5 \cdot 10^{-5}$

6.3. Розрахунок ймовірності безвідмовної роботи системи

Система вважається відмовостійкою, якщо усі її елементи працюють безвідмовно — тобто включення послідовне. Тоді:

$$P_{\text{системи}}(t) = \prod_{i=1}^n P_i(t) = e^{-(\lambda_1 + \lambda_2 + \dots + \lambda_n)t} = e^{-\lambda_{\Sigma} t}$$

де:

$$\lambda_{\Sigma} = \sum \lambda_i = 2 + 1 + 5 + 5 + 5 + 3.3 + 2.5 = 23.8 \cdot 10^{-5} = 2.38 \cdot 10^{-4}$$

Середній час безвідмовної роботи системи:

$$T_{\text{ср системи}} = \frac{1}{\lambda_{\Sigma}} = \frac{1}{2.38 \cdot 10^{-4}} \approx 4201 \text{ год}$$

Залежність ймовірності безвідмовної роботи від часу подано на графіку нижче.

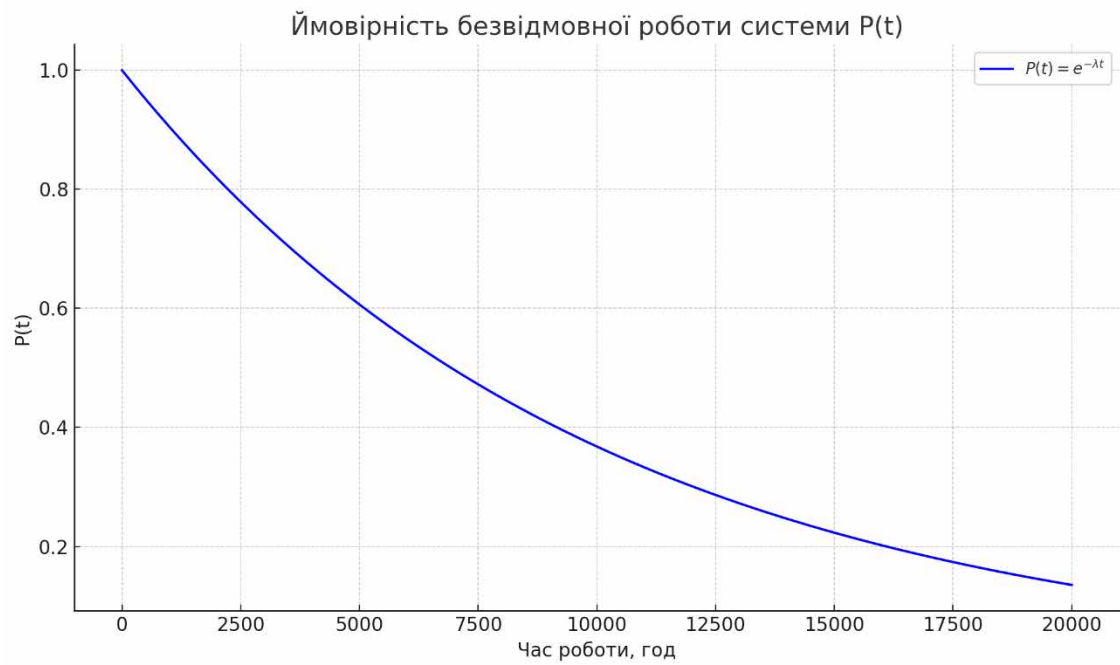


Рисунок 6.1 — Залежність $P(t)$ для $\lambda = 2.38 \cdot 10^{-4}$

Табл 6.2 Загальні витрати на впровадження системи

№	Компонент / послуга	Кількість	Ціна за одиницю, грн	Сума, грн
1	Arduino Mega 2560	1	600	600
2	DS18B20 (датчики по зонах, наприклад, 6 шт.)	6	100	600
3	Модулі реле 4-канальні	2	150	300
4	ESP8266 Wi-Fi модуль	1	120	120
5	Нагрівачі ТЕН (3 шт. по 500 Вт)	3	450	1 350
6	Вентилятори (3 зони)	3	200	600
7	Приводи фрамуг (3 зони)	3	350	1 050
8	Блоки живлення 220 → 12 В/5 В	3	180	540
9	Автомати 10 А (релейні групи)	3	120	360
10	Додаткове електрообладнання (клеми, корпуси)	—	—	1 000
11	Монтаж системи (електрика, налаштування)	—	—	2 000
12	Обслуговування протягом року	—	—	1 500
	РАЗОМ (одноразові + річне обслуговування)			10 020 грн

За даними власників теплиць:

- Витрати на електроопалення та вентиляцію в неоптимізованому режимі для великої теплиці — $\approx 30\,000\text{--}40\,000$ грн/сезон.
- Оптимізація роботи нагрівачів (через термоконтроль) дозволяє знизити витрати на $\approx 15\text{--}20\%$, тобто $\approx 6\,000\text{--}8\,000$ грн/сезон.

Термін окупності

$$T_{\text{окуп}} = \frac{10\,020}{7000} \approx 1.4 \text{ року (менше ніж 10 місяців)}$$

Підсумуємо:

- Загальні витрати на систему для великої теплиці становлять **$\approx 10\,000$ грн**, включаючи **монтаж і рік обслуговування**.
- Система окупається менш ніж за **півтора року** завдяки зменшенню витрат на енергію та обслуговування.
- Після окупності вона приносить **чисту економію щонайменше 7 000–10 000 грн/рік**.
- Розширення кількості зон контролю (наприклад, з 3 до 6) незначно впливає на загальні витрати — лише $\approx +20\text{--}30\%$.

ВИСНОВКИ

У процесі виконання кваліфікаційної роботи було спроектовано комп'ютерно-інтегровану систему автоматичного керування температурою повітря в промисловій теплиці на базі контролера Arduino Mega. Основною метою дослідження було створення ефективної системи, яка здатна підтримувати оптимальний температурний режим для вирощування сільськогосподарських культур, з використанням сучасних мікропроцесорних технологій, датчиків і виконавчих механізмів, а також з візуалізацією стану системи через візуальний інтерфейс. Система має забезпечити гнучке, надійне та економічно ефективне регулювання мікроклімату завдяки застосуванню розумного алгоритму керування, точного датчика температури та засобів віддаленого керування через мобільний застосунок.

У процесі роботи:

- ✓ Було проведено функціонально-структурний аналіз об'єкта автоматизації з урахуванням впливу температури, вологості, вентиляції та сонячного випромінювання.
- ✓ Виконано вибір технічних засобів автоматизації — датчика температури (DS18B20), виконавчих механізмів (нагрівач, вентилятор, сервомеханізм фрамуги), мікроконтролера (Arduino Mega 2560) та відповідних модулів реле.
- ✓ Розроблено алгоритм керування мікрокліматом, який реалізує керуючі впливи відповідно до значення температури всередині теплиці, з урахуванням гістерезису та мертвої зони, що дозволяє мінімізувати знос обладнання.
- ✓ Реалізовано модель системи в середовищі Arduino IDE та забезпечено інтеграцію з мобільним застосунком Blynk, що дає змогу не лише відображати актуальні значення температури, а й дистанційно змінювати порогові значення та контролювати стан виконавчих пристроїв.

✓ Проведено розробку схем електричних з'єднань, підключень та підбір апаратури захисту, враховуючи технічні характеристики кожного компонента та вимоги електробезпеки.

✓ Запропоновано техніко-економічне обґрунтування доцільності впровадження системи, де враховано вартість компонентів, витрати на монтаж і обслуговування, а також очікувану економію енергії та підвищення врожайності.

Запропонована система є модульною, масштабованою та енергоефективною, що дозволяє використовувати її як базу для подальшого розширення — наприклад, включення системи туманоутворення, освітлення або мультисенсорного моніторингу. Важливим аспектом є також її простота в обслуговуванні та гнучкість адаптації до різних умов експлуатації.

Результати роботи показали, що обрана архітектура на базі Arduino Mega з можливістю дистанційного моніторингу та управління через Blynk є технічно доцільною для малих та середніх промислових теплиць. Враховуючи рентабельність і надійність функціонування системи, запропоноване рішення може бути рекомендоване для впровадження в аграрному секторі, з можливістю подальшого переходу до більш складних комп'ютерно-інтегрованих систем із повною автоматизацією мікрокліматичних процесів.

Математичне моделювання та аналіз динамічних характеристик підтвердили доцільність запропонованого підходу, а структурно-функціональні та електротехнічні рішення відповідають сучасним вимогам до автоматизованих систем керування. Економічна оцінка показала високу ефективність проекту як для невеликих, так і для середніх за площею теплиць.

Запропонована система може бути масштабована, адаптована до інших параметрів мікроклімату (вологість, освітлення) та є прикладом впровадження елементів Інтернету речей (IoT) в аграрному секторі.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ ТА ІНТЕРНЕТ ДЖЕРЕЛ

1. Богданович І.Ю. Теорія автоматичного керування. – Львів: Видавництво ЛНУ, 2018. – 335 с.
2. Гук О.В., Погорілий С.О. Основи автоматизації технологічних процесів: навч. посіб. — Львів: Новий Світ, 2020. — 280 с.
3. Данилюк М.Ю. Електротехнічні пристрої автоматизованих систем. – К.: Либідь, 2020. – 280 с.
4. Качан В.І., Ярмолюк С.О. Основи автоматизації технологічних процесів. – Київ: Каравела, 2017. – 312 с.
5. Кириченко О.М. Автоматизовані системи управління технологічними процесами. — Харків: ХНУРЕ, 2019. — 325 с.
6. Кисельов С.І., Трофименко В.В. Мікроконтролери та їх застосування. – Харків: Техніка, 2020. – 256 с.
7. Клименко А.Ф., Губарев В.А. Елементи та пристрої автоматики. – Київ: Ліра-К, 2016. – 208 с.
8. Кожем'яко С.О. Теплотехніка. Основи теплопередачі та теплопостачання. – Харків: УПА, 2018. – 248 с.
9. Лисенко В.П., Дудник А.О., Мірошник В.О., Руденський А.А., Заєць Н.А. Основні методи та методики підготовки кваліфікаційної роботи бакалавра. — НУБіП України, 2023. — 298 с.
10. Назаренко О.В. Основи проектування комп'ютерно-інтегрованих систем. – Полтава: ПНТУ, 2022. – 221 с.
11. Пахольчук П.С. Системи автоматичного керування: навч. посіб. — Київ: КНЕУ, 2021. — 352 с.
12. Прокопенко Т.О., Березюк І.А., Зубенко В.О. Автоматизована система керування температурно-вологісним режимом теплиці на основі апарату нечіткої логіки // Вчені записки ТНУ ім. В.І. Вернадського. Серія: Технічні науки. — 2020. — Т. 31, № — С. 129–136.

13. Семенченко А.І. Системи управління мікрокліматом у теплицях. – Вінниця: ВНТУ, 2020. – 198 с.
14. Сидоренко В.І. Проектування автоматизованих систем. – К.: Основа, 2021. – 300 с.
15. Шаблій В.М. Мікроконтролери AVR: програмування мовою С. – К.: НТУУ “КПІ”, 2019. – 284 с.
16. Arduino Mega 2560 Rev3. Офіційна документація. [Електронний ресурс]. Режим доступу: <https://docs.arduino.cc/hardware/mega-2560>
17. DS18B20. Програмований цифровий термометр. [Електронний ресурс]. Режим доступу: <https://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/ds18b20.pdf>
18. Blynk IoT Platform. Офіційний сайт. [Електронний ресурс]. Режим доступу: <https://blynk.io>
19. SCADA Systems. Що таке SCADA? [Електронний ресурс]. Режим доступу: <https://inductiveautomation.com/resources/article/what-is-scada>
20. Automated Greenhouse Systems. Системи автоматизації теплиць. [Електронний ресурс]. Режим доступу: <https://climatecontrol.com/automated-greenhouse-systems/>
21. Getting Started with Arduino Mega 2560. Посібник для початківців. [Електронний ресурс]. Режим доступу: <https://docs.arduino.cc/tutorials/mega-2560/getting-started/>
22. DS18B20 Datasheet. Технічна документація. [Електронний ресурс]. Режим доступу: <https://www.alldatasheet.com/datasheet-pdf/pdf/58557/DALLAS/DS18B20.html>
23. Blynk Community. Спільнота розробників. [Електронний ресурс]. Режим доступу: <https://community.blynk.cc/>
24. SCADA Systems Overview. Огляд SCADA-систем. [Електронний ресурс]. Режим доступу: <https://www.onlogic.com/blog/what-is-a-scada-system-and-how-does-it-work/>

25. Greenhouse Automation Systems. Автоматизація теплиць. [Електронний ресурс]. Режим доступу: <https://www.priva.com/blog/horticulture/greenhouse-automation-systems>
26. Arduino Mega 2560 Rev3 Datasheet. Технічна документація. [Електронний ресурс]. Режим доступу: <https://docs.arduino.cc/resources/datasheets/A000067-datasheet.pdf>
27. DS18B20 Waterproof Temperature Sensor. Водонепроникний температурний датчик. [Електронний ресурс]. Режим доступу: <https://www.quick-teck.co.uk/Management/EEUploadFile/1420644897.pdf>
28. Blynk IoT App. Додаток на Google Play. [Електронний ресурс]. Режим доступу: https://play.google.com/store/apps/details?hl=en_US&id=cloud.blynk
29. SCADA Systems and How They Work. Як працюють SCADA-системи. [Електронний ресурс]. Режим доступу: <https://www.fortinet.com/resources/cyberglossary/scada-and-scada-systems>
30. Greenhouse Control Systems. Системи керування теплицями. [Електронний ресурс]. Режим доступу: <https://climatecontrol.com/greenhouse-control-systems/>
31. Arduino Mega 2560 Getting Started. Початок роботи з Arduino Mega 2560. [Електронний ресурс]. Режим доступу: <https://docs.arduino.cc/tutorials/mega-2560/getting-started/>
32. DS18B20 Digital Temperature Sensor. Цифровий температурний датчик. [Електронний ресурс]. Режим доступу: <https://www.adafruit.com/product/381>
33. SCADA Systems Explained. Пояснення SCADA-систем. [Електронний ресурс]. Режим доступу: <https://www.scadalink.com/support/knowledge-base/an-introduction-to-scada/>
34. Greenhouse Automation. Автоматизація теплиць. [Електронний ресурс]. Режим доступу: <https://www.spagnol.com/en-us/solutions/greenhouse-automation>

35. Arduino Mega 2560 Technical Description. Технічний опис. [Електронний ресурс]. Режим доступу: <https://forum.arduino.cc/t/technical-description-of-the-mega-2560/526459>
36. DS18B20 Datasheet and Product Info. Інформація про продукт. [Електронний ресурс]. Режим доступу: <https://www.analog.com/en/products/ds18b20.html>
37. Blynk on LinkedIn. Профіль компанії. [Електронний ресурс]. Режим доступу: <https://www.linkedin.com/company/b-1-y-n-k>
38. SCADA Systems: What They Are & How They Work. Що таке SCADA-системи. [Електронний ресурс]. Режим доступу: https://www.splunk.com/en_us/blog/learn/scada-systems.html
39. Smart Greenhouse Automation System. Розумна автоматизація теплиць. [Електронний ресурс]. Режим доступу: <https://controlbyweb.com/blog/smart-greenhouse-automation-system/>
40. Arduino MEGA 2560 Overview. Огляд Arduino MEGA 2560. [Електронний ресурс]. Режим доступу: https://portals.docsie.io/wlkata-robotics/wlkata_robotics_document/welcome-to-docsie-red-beta-mayer/deployment_mi7d471IH33Hz2NKM/
41. Guide for DS18B20 Temperature Sensor with Arduino. Посібник з використання DS18B20 з Arduino. [Електронний ресурс]. Режим доступу:

Додаток В Код для керування мікрокліматом за допомогою Arduino

```

#include <OneWire.h>

#include <DallasTemperature.h>

#include <SoftwareSerial.h>

#include <BlynkSimpleShieldEsp8266.h>

// --- ПІНи ---

#define ONE_WIRE_BUS 2          // DS18B20

#define HEATER_PIN 8           // Реле нагрівача

#define FAN_PIN 9              // Реле вентилятора

#define WINDOW_PIN 7           // Реле фрамуги

// --- Wi-Fi / Blynk ---

char auth[] = "Ваш_Token_від_Blynk"; // вставити токен Blynk

char ssid[] = "Назва_WiFi";        // Wi-Fi ім'я

char pass[] = "Пароль_WiFi";       // Wi-Fi пароль

SoftwareSerial EspSerial(10, 11); // RX, TX (Mega ↔ ESP8266)

#define ESP8266_BAUD 9600

ESP8266 wifi(&EspSerial);

// --- Температура ---

OneWire oneWire(ONE_WIRE_BUS);

DallasTemperature sensors(&oneWire);

float currentTemp = 0;

// --- Порогові значення (змінювані в Blynk) ---

float minTemp = 20.0;

```

```
float maxTemp = 26.0;

float hysteresis = 1.0;

// --- Blynk змінні ---

BlynkTimer timer;

// --- Функції керування ---

void readTemperature() {

    sensors.requestTemperatures();

    currentTemp = sensors.getTempCByIndex(0);

    // Відправити температуру в Blynk

    Blynk.virtualWrite(V0, currentTemp);

    // Логіка керування:

    if (currentTemp <= minTemp - hysteresis) {

        digitalWrite(HEATER_PIN, HIGH); // Увімкнути нагрівач

        digitalWrite(FAN_PIN, LOW);

        digitalWrite(WINDOW_PIN, LOW);

        Blynk.virtualWrite(V1, 1); // Heater ON

        Blynk.virtualWrite(V2, 0); // Fan OFF

        Blynk.virtualWrite(V5, 0); // Window CLOSED

    }

    else if (currentTemp >= maxTemp + hysteresis) {

        digitalWrite(HEATER_PIN, LOW);

        digitalWrite(FAN_PIN, HIGH); // Увімкнути вентилятор

        digitalWrite(WINDOW_PIN, HIGH); // Відкрити фрамугу

        Blynk.virtualWrite(V1, 0);

        Blynk.virtualWrite(V2, 1);

        Blynk.virtualWrite(V5, 1); // Window OPEN

    }

    else {

        // Мертва зона – нічого не вмикаємо

    }

}
```

```
digitalWrite(HEATER_PIN, LOW);

digitalWrite(FAN_PIN, LOW);

digitalWrite(WINDOW_PIN, LOW);

Blynk.virtualWrite(V1, 0);

Blynk.virtualWrite(V2, 0);

Blynk.virtualWrite(V5, 0);

}

}

// --- Зчитування нових порогів з Blynk ---

BLYNK_WRITE(V3) { minTemp = param.asFloat(); }

BLYNK_WRITE(V4) { maxTemp = param.asFloat(); }

void setup() {

  Serial.begin(9600);

  EspSerial.begin(ESP8266_BAUD);

  Blynk.begin(auth, wifi, ssid, pass);

  sensors.begin();

  pinMode(HEATER_PIN, OUTPUT);

  pinMode(FAN_PIN, OUTPUT);

  pinMode(WINDOW_PIN, OUTPUT);

  digitalWrite(HEATER_PIN, LOW);

  digitalWrite(FAN_PIN, LOW);

  digitalWrite(WINDOW_PIN, LOW);

  // Оновлення кожні 2 сек

  timer.setInterval(2000L, readTemperature);

}

void loop() {

  Blynk.run();

  timer.run();

}
```