

СХІДНОУКРАЇНСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
ІМЕНІ ВОЛОДИМИРА ДАЛЯ

Факультет інформаційних технологій та електроніки
Кафедра комп'ютерно-інтегрованих систем управління

ПОЯСНЮВАЛЬНА ЗАПИСКА

до магістерської науково-дослідної роботи

освітній ступінь: магістр

спеціальність: 174 – Автоматизація, комп'ютерно-інтегровані технології та
робототехніка

(шифр і назва спеціальності)

на тему **«Дослідження та аналіз комп'ютерно-інтегрованих
методів управління мікрокліматом тепличних комплексів із
використанням рекуперації тепла»**

Виконав: студент групи АТП-24дм


(підпис)

М. А. Анікєєв

Керівник


(підпис)

Т. Г. Сотнікова

Завідувачка кафедри


(підпис)

М. Г. Лорія

Рецензент


(підпис)

П. Й. Єлісєєв

Київ 2025

**СХІДНОУКРАЇНСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
імені ВОЛОДИМИРА ДАЛЯ**

Факультет: Інформаційних технологій та електроніки

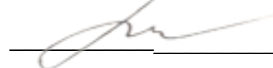
Кафедра: Комп'ютерно-інтегрованих систем управління

Освітньо-кваліфікаційний рівень: Магістр

Напрямок підготовки: 174 – Автоматизація комп'ютерно-інтегрованих технологій та робототехніка

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувачка каф. КІСУ



М.Г. Лорія

« 09 » грудня 2025 року

**З А В Д А Н Н Я
НА МАГІСТЕРСЬКУ НАУКОВО-ДОСЛІДНУ РОБОТУ
ЗДОБУВАЧУ ВИЩОЇ ОСВІТИ**

Анікеєву Микиті Андрійовичу

1. Тема магістерської НДР: «Дослідження та аналіз комп'ютерно-інтегрованих методів управління мікрокліматом тепличних комплексів із використанням рекуперації тепла»

2. Керівник роботи: доц. Сотнікова Т.Г.

Затверджені наказом вищого навчального закладу №242/17.02 від 28.11.2025 р.

3. Термін подання студентом роботи 14 грудня 2025 р.

4. Вихідні дані до роботи:

4.1. Технічна документація та принципи роботи систем керування мікрокліматом тепличних комплексів.

4.2. Інструкція з експлуатації автоматизованих систем контролю та керування мікрокліматом тепличних комплексів.

4.3. Нормативно-технічні матеріали та рекомендації щодо проєктування систем автоматизованого керування мікрокліматом та рекуперації тепла.

4.4. Публікації з питань автоматизованого керування параметрами мікроклімату тепличних комплексів (температура, вологість, концентрація CO₂, повітрообмін).

4.5. Публікації з моделювання та оптимізації систем керування мікрокліматом із використанням рекуперації тепла та комп'ютерно-інтегрованих методів управління.

5. Зміст розрахунково-пояснювальної записки:

5.1. Вступ.

5.2. Аналіз сучасного стану автоматизації технологій забезпечення енергоефективного опалення тепличних господарств.

5.3. Аналіз технологічних процесів та обґрунтування використання вторинної технологічної пари для опалення тепличного комплексу.

5.4. Тепличний комплекс як об'єкт автоматизованого керування та характеристика його теплотехнічних і технологічних параметрів.

5.5. Вибір і характеристика сільськогосподарських культур для вирощування в умовах автоматизованої теплиці.

5.6. Особливості формування мікроклімату та повітрообміну в тепличному комплексі.

5.7. Теоретичні дослідження математичних моделей системи опалення тепличного середовища.

5.8. Розробка та дослідження математичних моделей процесу опалення тепличного середовища і контуру керування теплообмінником.

5.9. Аналіз автоматизованих систем керування мікрокліматом з рекуперацією тепла та формування завдань магістерської науково-дослідної роботи.

5.10. Теоретичні дослідження математичних моделей системи опалення тепличного середовища з урахуванням рекуперації тепла.

5.11. Розробка програмної та комп'ютерно-інтегрованої реалізації системи керування тепличним мікрокліматом у SCADA-середовищі.

5.12. Розробка спеціалізованого програмного інструменту для моделювання процесу керування мікрокліматом теплиці.

5.13. Порівняльний аналіз SCADA-системи TraceMode та власної програмної реалізації.

5.14. Аналіз результатів моделювання та оцінка ефективності комп'ютерно-інтегрованих методів керування мікрокліматом із рекуперацією тепла.

5.15. Висновки.

6. Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень)

6.1. Структурні та функціональні схеми системи керування мікрокліматом тепличного комплексу.

6.1.1. Структурна схема автоматизованої системи керування мікрокліматом тепличного комплексу.

6.1.2. Архітектура комп'ютерно-інтегрованої системи керування мікрокліматом тепличного комплексу.

6.1.3. Алгоритмічні схеми керування параметрами мікроклімату з використанням рекуперації тепла.

6.2. Схема моделювання системи керування мікрокліматом тепличного комплексу в динамічному режимі роботи.

6.3. Математична модель системи керування мікрокліматом тепличного комплексу.

6.4. Статичні та динамічні характеристики системи керування мікрокліматом.

6.5. Результати моделювання та оцінка ефективності рекуперації тепла в системі керування мікрокліматом.

7. Дата видачі завдання: 25 жовтня 2025 р.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів дипломного роботи	Термін виконання етапів роботи	Примітка
1	Аналіз сучасного стану автоматизації технологічних процесів керування мікрокліматом тепличних комплексів.	1.11.2025	
2.	Аналіз автоматизованих систем контролю та керування мікрокліматом тепличних комплексів із використанням рекуперації тепла та розробка завдань для виконання магістерської НДР.	1.11.2025	
3.	Розробка математичної моделі системи керування мікрокліматом тепличного комплексу з урахуванням процесів рекуперації тепла.	5.11.2025	
4.	Розробка мнемосхем комп'ютерно-інтегрованої системи управління (КІСУ) мікрокліматом тепличного комплексу.	8.11.2025	
5.	Розробка програмного забезпечення роботи КІСУ ТП мікроклімату тепличного комплексу в динамічному режимі роботи.	15.11.2025	

6.	Теоретичні дослідження математичної моделі системи керування мікрокліматом тепличного комплексу з рекуперацією тепла.	25.11.2025	
7.	Аналіз результатів теоретичних досліджень та оцінка ефективності комп'ютерно-інтегрованих методів керування мікрокліматом.	1.12.2025	
9.	Оформлення пояснювальної записки магістерської роботи та підготовка презентаційних матеріалів.	14.12.2025	

Здобувач вищої освіти  М. А. Анікєєв

Керівник магістерської НДР  Т.Г. Сотнікова

РЕФЕРАТ

Пояснювальна записка містить 105 сторінок, 22 рисунки, 50 джерел.

ТЕПЛИЧНИЙ КОМПЛЕКС, МІКРОКЛІМАТ, РЕКУПЕРАЦІЯ ТЕПЛА, ВТОРИННА ТЕХНОЛОГІЧНА ПАРА, АВТОМАТИЗАЦІЯ, КОМП'ЮТЕРНО-ІНТЕГРОВАНА СИСТЕМА КЕРУВАННЯ, МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ, ТЕПЛОТЕХНІЧНИЙ РОЗРАХУНОК, ПЕРЕХІДНІ ПРОЦЕСИ, SCADA-СИСТЕМА, TRACE MODE, ПРОГРАМНА РЕАЛІЗАЦІЯ, АВТОМАТИЧНЕ РЕГУЛЮВАННЯ.

Об'єктом теоретичного дослідження є система опалення та мікроклімату тепличного комплексу, що використовує вторинну технологічну пару промислового виробництва як джерело теплової енергії.

Метою магістерської науково-дослідної роботи є дослідження та аналіз комп'ютерно-інтегрованих методів керування мікрокліматом тепличних комплексів із використанням рекуперації тепла, а також розробка математичних моделей, алгоритмів автоматичного керування та програмної реалізації системи керування в SCADA-середовищі та у власному спеціалізованому програмному інструменті.

Метод дослідження є теоретичний із застосуванням методів математичного моделювання, теорії автоматичного керування та комп'ютерного імітаційного експерименту з використанням електронно-обчислювальної техніки.

У процесі виконання магістерської роботи проведено аналіз сучасного стану автоматизації тепличних господарств та енергоефективних технологій опалення, обґрунтовано доцільність використання вторинної технологічної пари для теплопостачання теплиці. Розглянуто тепличний комплекс як об'єкт автоматизованого керування, визначено його теплотехнічні та динамічні характеристики.

Розроблено математичні моделі процесу опалення тепличного середовища та контуру керування теплообмінником, виконано теплотехнічні

розрахунки, досліджено статичні та динамічні властивості системи. На основі отриманих моделей синтезовано алгоритми автоматичного регулювання температури мікроклімату з урахуванням інерційності теплових процесів.

Здійснено програмну та комп'ютерно-інтегровану реалізацію системи керування в SCADA-середовищі Trace Mode, а також розроблено власний спеціалізований програмний інструмент для моделювання та аналізу процесів керування мікрокліматом теплиці. Проведено порівняльний аналіз можливостей SCADA-системи та власної програмної реалізації.

Отримані результати моделювання дозволили оцінити ефективність застосування рекуперації тепла, підтвердити стабільність і керованість температурного режиму тепличного комплексу, а також показали доцільність використання комп'ютерно-інтегрованих методів керування для підвищення енергоефективності та надійності тепличного виробництва.

ЗМІСТ

ВСТУП.....	10
1 АНАЛІЗ СУЧАСНОГО СТАНУ АВТОМАТИЗАЦІЇ ТЕХНОЛОГІЙ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ЕНЕРГОЕФЕКТИВНОГО ОПАЛЕННЯ ТЕПЛИЧНИХ ГОСПОДАРСТВ	13
1.1 Аналіз енергоефективності в сільськогосподарському виробництві та роль тепличних господарств	13
1.2 Аналіз сучасного стану автоматизації сільсько господарської діяльності	16
1.3 Аналіз технологічного процесу	23
1.4 Тепличний комплекс як об'єкт автоматизованого керування	25
1.5 Вибір та характеристика культур для вирощування в тепличному господарс.	28
1.6 Особливості мікроклімату та повітрообміну в теплиці.....	33
2. РОЗРОБКА ТА ДОСЛІДЖЕННЯ АВТОМАТИЗОВАНОЇ СИСТЕМИ РЕГУЛЮВАННЯ.....	36
2.1 Теоретичні дослідження математичних моделей системи опалення тепличного середовища	36
2.2 Розробка та аналіз математичних моделей процесу опалення тепличного середовища	38
2.3 Розрахунок теплотехнічних параметрів системи опалення теплиці з кожухотрубним теплообмінником	44
2.4 Аналіз автоматизованих систем керування мікрокліматом з рекуперацією тепла та формування завдань роботи	48
2.4.1 Екологічні та безпекові аспекти використання рекуперації тепла в системі керування мікрокліматом тепличного комплексу	51
2.4.2 Інтеграція методів комп'ютерного зору як джерела зворотного зв'язку в комп'ютерно-інтегрованих системах тепличних комплексів.....	53
3 ТЕОРЕТИЧНІ ДОСЛІДЖЕННЯ МАТЕМАТИЧНИХ МОДЕЛЕЙ СИСТЕМИ ОПАЛЕННЯ ТЕПЛИЧНОГО СЕРЕДОВИЩА	59
3.1 Вибір комплексу технічних засобів.....	60
3.2 Аналіз та розрахунок теплових процесів	63
3.3 Аналіз результатів теоретичних досліджень	67
3.4 Розробка функціональної схеми АСК ТП системи опалення тепличного середовища	69
4 ПРОГРАМНА ТА КОМП'ЮТЕРНО-ІНТЕГРОВАНА РЕАЛІЗАЦІЯ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ ТЕПЛИЧНИМ МІКРОКЛІМАТОМ.....	73

4.1 Архітектура комп'ютерно-інтегрованої системи керування тепличним мікрокліматом	75
4.2 Програмна реалізація системи керування в SCADA-середовищі	77
4.2.1 Операторська візуальна модель теплотехнічного контуру	79
4.2.2 Візуалізація процесу та часові залежності параметрів	84
4.3 Спеціалізований програмний інструмент для моделювання процесу керування мікрокліматом теплиці	86
4.3.1 Призначення та загальна структура власної програмної розробки	88
4.3.2 Реалізація математичної моделі та алгоритму керування у власній програмі	91
4.3.3 Аналіз динамічних і частотних властивостей системи керування, реалізованої у власному програмному середовищі	93
4.3.3 Особливості роботи та функціональні можливості власного програмного інструменту	97
4.4 Порівняльний аналіз SCADA TraceMode та спеціалізованої програмної реалізації	99
ВИСНОВКИ	101
ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ	104

СПИСОК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ

АСУ ТП – автоматизована система управління технологічним процесом;
АЧХ – амплітудно-частотна характеристика;
ВМ – виконавчий механізм;
ВП – вторинний прилад;
ДЧХ – дійсна частотна характеристика;
НП – нормуючий перетворювач;
ОР – об'єкт регулювання;
ПВП – первинний вимірювальний перетворювач;
ПП – проміжний перетворювач;
Р – регулятор;
РО – регулюючий орган;
САР – система автоматизованого управління;
УЧХ – уявна частотна характеристика;
ФЧХ – фазова частотна характеристика

ВСТУП

Тепличне виробництво в Україні впродовж останніх років набуло особливої актуальності, що зумовлено як кліматичними особливостями регіону, так і зростаючими вимогами до стабільності та прогнозованості аграрного виробництва. Теплиці забезпечують можливість вирощування сільськогосподарської продукції в періоди, коли традиційні ґрунтові технології стають малоефективними або практично недоступними. Цілорічний характер виробництва створює суттєві конкурентні переваги, проте водночас висуває підвищені вимоги до підтримання внутрішнього мікроклімату. Температурний режим, вологість повітря та концентрація вуглекислого газу безпосередньо впливають не лише на кількісні та якісні показники врожаю, але й на економічну ефективність функціонування тепличного господарства.

Підтримання стабільних параметрів мікроклімату пов'язане зі значними енергетичними витратами. У структурі споживання енергії тепличних комплексів домінуюче місце займає опалення, а його собівартість істотно впливає на вартість кінцевої продукції. В умовах нестабільного енергетичного середовища, що характеризується коливанням цін, обмеженнями постачання та підвищеними технічними ризиками, забезпечення необхідного теплового режиму стає складним інженерним завданням. Це зумовлює потребу у впровадженні рішень, спрямованих на раціональніше використання наявних енергетичних ресурсів і зниження залежності від зовнішніх факторів.

Одним із перспективних напрямів підвищення енергоефективності тепличних господарств є використання тепла, що утворюється як побічний продукт промислових або технологічних процесів. Замість втрат у навколишнє середовище це тепло може бути рекупероване та повторно залучене до системи опалення теплиць. Такий підхід дозволяє скоротити

споживання первинних енергоресурсів, зменшити вплив коливань цін на паливо та підвищити передбачуваність експлуатаційних витрат. Водночас стабільні теплові умови позитивно впливають на фізіологічний стан рослин, знижують рівень стресу, спричиненого різкими температурними коливаннями, та сприяють вирівнюванню виробничих циклів.

Паралельно з розвитком енергоефективних підходів у тепличному господарстві активно впроваджуються засоби автоматизації та цифрового керування. Сучасна теплиця дедалі більше розглядається як складна інженерна система, у якій фізичні, біологічні та інформаційні процеси тісно взаємопов'язані. Дані з вимірювальних сенсорів надходять у реальному часі, а режими роботи обладнання коригуються відповідно до поточного стану системи та прогнозних оцінок. Комп'ютерно-інтегровані системи управління забезпечують не лише підтримання заданих параметрів мікроклімату, а й адаптацію режимів опалення, вентиляції та зволоження до змін зовнішніх і внутрішніх умов. У результаті зменшуються непродуктивні енергетичні втрати, підвищується надійність роботи обладнання та керованість технологічного процесу.

Поєднання підходів до рекуперації теплових ресурсів із цифровими методами управління формує перспективну модель розвитку тепличних господарств. Йдеться не про окремі енергоощадні заходи, а про створення цілісної архітектури, у якій джерела тепла, контури розподілу енергії, вимірювальні засоби та алгоритми регулювання функціонують узгоджено. Побудова такої системи відкриває можливість створення математичних і імітаційних моделей, що дозволяють відтворювати поведінку реального об'єкта, проводити дослідження віртуально та визначати оптимальні режими роботи ще до їх практичного впровадження.

У межах даної магістерської роботи увага зосереджується на аналізі комп'ютерно-інтегрованих методів керування мікрокліматом тепличних комплексів з урахуванням використання рекуперованого тепла.

Розглядаються умови функціонування теплиць, особливості формування внутрішнього середовища, технічні можливості залучення вторинних енергетичних ресурсів, а також роль програмно-апаратних засобів у забезпеченні стабільності параметрів мікроклімату. Окремо враховується взаємодія з суміжними підсистемами, зокрема модулями моніторингу стану рослин і якості продукції, оскільки отримана з них інформація може бути використана для корекції режимів керування.

Метою роботи є формування підходів до побудови системи, у якій вторинні теплові ресурси використовуються раціонально, а процеси підтримання внутрішніх параметрів теплиці регулюються автоматизовано на основі достовірних вимірювань і прогнозних оцінок. Отримані результати слугують основою для подальшої розробки математичної моделі та програмного інструменту, що дозволяють аналізувати чутливість системи до збурень, перевіряти різні стратегії керування та обирати режими, які відповідають як технологічним вимогам, так і економічним обмеженням.

1 АНАЛІЗ СУЧАСНОГО СТАНУ АВТОМАТИЗАЦІЇ ТЕХНОЛОГІЙ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ЕНЕРГОЕФЕКТИВНОГО ОПАЛЕННЯ ТЕПЛИЧНИХ ГОСПОДАРСТВ

1.1 Аналіз енергоефективності в сільськогосподарському виробництві та роль тепличних господарств

Сільське господарство традиційно є однією з ключових галузей економіки, що визначає рівень продовольчої безпеки, соціальної стабільності та економічної самодостатності держави. У сучасних умовах розвиток аграрного сектору відбувається під впливом комплексу взаємопов'язаних чинників, серед яких провідне місце посідають кліматичні зміни, зростання світового населення, підвищення вимог до якості та безпеки харчової продукції, а також ускладнення доступу до енергетичних ресурсів. За цих умов проблема ефективного використання енергії набуває стратегічного значення, оскільки саме енергетичні витрати формують істотну частку собівартості аграрної продукції та безпосередньо впливають на її конкурентоспроможність на внутрішньому й зовнішньому ринках.

Енергоефективність у сільському господарстві розглядається як комплексна характеристика, що відображає здатність виробничих систем досягати необхідного рівня продуктивності за мінімальних витрат енергетичних ресурсів. Вона охоплює широкий спектр заходів — від удосконалення технологічних процесів і модернізації обладнання до впровадження систем автоматизованого керування, енергетичного менеджменту та підготовки персоналу. Важливість енергоефективності зумовлена не лише економічними міркуваннями, а й екологічними аспектами, оскільки зменшення споживання енергії сприяє скороченню викидів парникових газів, зниженню антропогенного навантаження на довкілля та переходу до більш сталих моделей господарювання.

Особливу увагу в контексті енергоефективності привертає тепличне господарство. Теплиці відіграють важливу роль у сучасному аграрному виробництві, забезпечуючи можливість цілорічного вирощування сільськогосподарських культур незалежно від сезонних і кліматичних обмежень. Контрольоване середовище дозволяє отримувати стабільні врожаї в регіонах із несприятливими умовами відкритого ґрунту, мінімізувати вплив погодних коливань на обсяги та якість продукції, а також раціональніше використовувати водні й земельні ресурси. Саме завдяки тепличним комплексам формується стійка система постачання овочевої продукції в міжсезонний і зимовий періоди, що знижує залежність внутрішнього ринку від імпорту та підвищує рівень продовольчої безпеки. [31]

Разом із тим тепличне виробництво є одним із найбільш енергоємних напрямів сільського господарства. Для підтримання оптимального мікроклімату необхідна безперервна робота систем опалення, вентиляції, зволоження та штучного освітлення. За результатами галузевих досліджень, витрати енергії на ці потреби можуть становити від 40 до 60 % загальних експлуатаційних витрат тепличного господарства, що робить енергоефективність визначальним чинником економічної доцільності такого виробництва. У цих умовах навіть часткове зниження енергоспоживання без погіршення умов росту рослин має суттєвий вплив на рентабельність і стабільність функціонування тепличних підприємств.

Порівняльний аналіз розвитку тепличного сектору в Україні та країнах Європейського Союзу свідчить про наявність суттєвих відмінностей у рівні технологічного розвитку та підходах до управління енергетичними ресурсами. У країнах ЄС, зокрема в Нідерландах, за останні десятиліття сформувалася високотехнологічна модель тепличного виробництва, у межах якої теплиця розглядається не як допоміжна споруда, а як складна інженерна система, що інтегрує біологічні, енергетичні та інформаційні процеси. Автоматизоване регулювання температури, вологості, освітленості та

газового складу повітря є стандартною практикою для більшості сучасних тепличних комплексів.

Для України тепличне господарство перебуває на етапі структурної трансформації. З одного боку, країна має значний аграрний потенціал і сприятливі природно-кліматичні умови, з іншого значна частина тепличних господарств характеризується застарілою матеріально-технічною базою, недостатнім рівнем автоматизації та високими питомими енергетичними витратами. Додатковими обмежувальними чинниками є зростання вартості енергоносіїв, обмежений доступ до інвестиційних ресурсів та наслідки економічної й інфраструктурної нестабільності. Водночас орієнтація України на європейські ринки та необхідність підвищення конкурентоспроможності аграрної продукції зумовлюють потребу в поступовому впровадженні енергоефективних і цифрових рішень у тепличному виробництві.

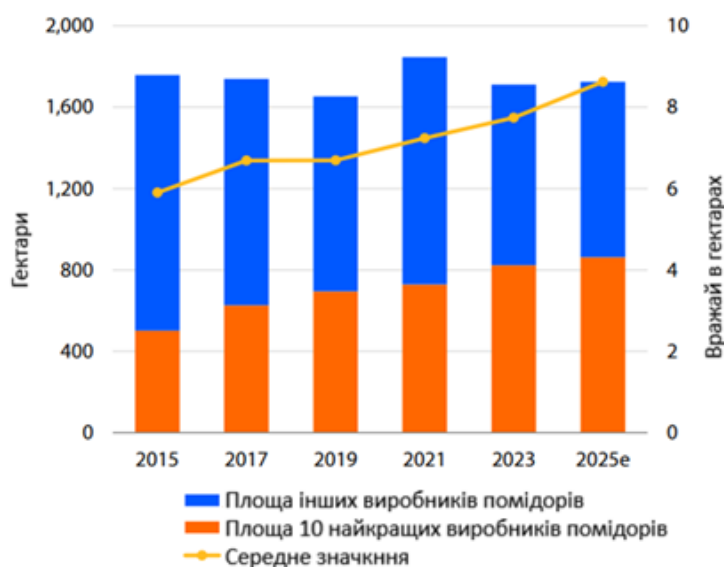


Рисунок 1.1 - Розмір нідерландських виробників помідорів, 2015-2025 рр.[31]

Показовим у цьому контексті є досвід Нідерландів, де простежується чітка тенденція до укрупнення тепличних господарств. Зменшення кількості дрібних виробників і зростання частки великих операторів створює передумови для впровадження складних енергозберігаючих технологій, економічна ефективність яких проявляється насамперед за значних

масштабів виробництва. Динаміка зміни розмірів тепличних господарств з вирощування томатів у Нідерландах у 2015–2025 рр., наведена на рисунку 1.1, демонструє зростання частки великих виробників, що дозволяє ефективніше інтегрувати цифрові технології, автоматизовані системи керування та рішення з рекуперації тепла.[31]

Одним із ключових напрямів підвищення енергоефективності в тепличному господарстві є впровадження сучасних технічних рішень, зокрема енергоощадних систем опалення, ефективної теплоізоляції, світлодіодного освітлення та автоматизованого керування мікрокліматом. Значну роль відіграє також використання вторинних і відновлюваних джерел енергії, що дозволяє зменшити залежність від традиційних енергоносіїв. Для України особливо перспективним є поєднання тепличного виробництва з промисловими об'єктами, що створює можливості для використання вторинного тепла та підвищення загальної енергоефективності агропромислових систем.

Таким чином, тепличні господарства є водночас одним із найбільш енергоємних і найбільш перспективних напрямів сільськогосподарського виробництва. Досвід країн Європейського Союзу, зокрема Нідерландів, свідчить про ефективність інтеграції енергоефективних технологій, автоматизованих систем управління та рішень з рекуперації тепла. Для України адаптація такого підходу з урахуванням національних умов і ресурсних обмежень є важливим кроком на шляху до формування стійкої, технологічно розвиненої моделі аграрного сектору, що визначає актуальність і практичну значущість подальших досліджень у межах даної роботи.[31]

1.2 Аналіз сучасного стану автоматизації сільсько господарської діяльності

Автоматизація в сільському господарстві є комплексним та багатогранним поняттям, яке охоплює використання автоматичних і

автоматизованих пристроїв і систем для повного або часткового звільнення людини від виконуваної роботи.

Це вищий етап розвитку виробництва, на якому працівники вивільняються не тільки від фізичної праці, а й, частково, від функцій контролю за машинами та обладнанням.

Автоматизація в агросекторі включає в себе впровадження інформаційних технологій у процес управління виробничими процесами та операціями з управління ними, що сприяє підвищенню продуктивності й поліпшенню умов праці.[19]

Вона охоплює широкий спектр застосувань, від автоматизації окремих процесів, таких як вентиляція, тепловий режим овочесховищ, дощувальні установки в теплицях, до комплексної автоматизації всього виробництва з використанням автоматизованих систем управління.

Сучасні технології, такі як точне землеробство та Інтернет речей, стають традиційною програмою розвитку найбільших агропромислових компаній світу, що дозволяє збільшити продуктивність сільського господарства, стабілізувати результати, мінімізувати витрати та підвищити конкурентоспроможність.

Автоматизація бізнес планування в сільському господарстві дозволяє формувати бюджети, аналізувати рентабельність вирощуваних культур, автоматизувати всі види обліку на підприємствах, що підвищує рентабельність виробництва і дозволяє виявляти безперспективні напрями діяльності.

Об'єктами автоматизації у сільському господарстві є технологічні процеси, такі як створення мікроклімату, приготування та роздача кормів, сушіння та очищення продукції, а також мобільна техніка, включаючи трактори, комбайни, сівалки.

Автоматизація та роботизація в сільському господарстві відкривають нові перспективи для розвитку галузі, зокрема, збільшення автоматизації

знижує витрати підприємства для обстеження своїх орних земель і прискорює цей процес, вимагаючи появи нових кадрів, операторів такої техніки.

Виробничі процеси в сільському господарстві складні і різноманітні, мають значний обсяг технологічної інформації і тісний взаємозв'язок, що робить автоматизацію ключовим елементом для підвищення ефективності та продуктивності.[14]

Етапи розвитку автоматизації в сільському господарстві можна розглядати як відображення загального прогресу в області технологій та їх застосування в аграрному секторі. Цей процес розвитку можна поділити на кілька ключових етапів, кожен з яких характеризується певними інноваціями та змінами в підходах до ведення сільськогосподарської діяльності.

Перший етап: Механізація

На початковому етапі розвитку автоматизації в сільському господарстві основну увагу приділяли механізації праці. Використання механічних засобів, таких як трактори та комбайни, дозволило значно підвищити продуктивність праці та зменшити фізичні зусилля, необхідні для обробки землі та збору врожаю.

Другий етап: Впровадження електроніки та комп'ютеризація

Наступний етап характеризується впровадженням електронних пристроїв та комп'ютерних технологій в аграрний сектор. Це дало змогу автоматизувати процеси збору та обробки даних, контролю за станом обладнання та впровадження систем точного землеробства.

Третій етап: Цифровізація та інтеграція систем.

На цьому етапі відбувається перехід від окремих автоматизованих рішень до цілісних цифрових систем управління аграрними процесами. Використання Інтернету речей, супутникового моніторингу, дронів та інших інноваційних технологій дозволяє створювати інтегровані системи, які забезпечують

високий рівень контролю та управління всіма аспектами сільськогосподарської діяльності.

Четвертий етап: Інтелектуальна автоматизація

Сучасний етап розвитку автоматизації в сільському господарстві характеризується впровадженням елементів штучного інтелекту та машинного навчання. Це дозволяє не тільки автоматизувати рутинні процеси, але й забезпечити адаптивність та прогнозування в аграрному виробництві. Використання алгоритмів штучного інтелекту для аналізу великих обсягів даних сприяє оптимізації виробничих процесів, підвищенню врожайності та зниженню витрат. [15]

Кожен з цих етапів відіграв важливу роль у розвитку автоматизації в сільському господарстві, сприяючи підвищенню ефективності та продуктивності аграрного сектору. Перехід до інтелектуальної автоматизації відкриває нові перспективи для подальшого розвитку галузі, забезпечуючи високий рівень адаптивності та ефективності. Сучасний стан автоматизації в сільському господарстві характеризується широким використанням інноваційних технологій, які змінюють традиційні підходи до аграрного виробництва. Огляд сучасних технологій автоматизації включає в себе наступні ключові напрямки:

Точне землеробство використовує супутникові системи навігації, такі як GPS, для точного визначення положення техніки на полі та оптимізації внесення добрив, посіву насіння та збору врожаю. Це дозволяє мінімізувати витрати та збільшити врожайність за рахунок більш точного управління ресурсами.

Автоматизовані системи управління включають системи автоматичного управління кліматом, поливом та живленням рослин в теплицях та на відкритих полях, які дозволяють створювати оптимальні умови для росту рослин, знижуючи при цьому витрати на воду та добрива.

Роботизоване обладнання охоплює роботизовані трактори, сівалки та комбайни, які можуть працювати автономно або з мінімальним втручанням оператора, забезпечуючи високу точність виконання робіт та знижуючи потребу в ручній праці.

Дрони та безпілотні літальні апарати використовуються для моніторингу стану полів, виявлення хвороб та шкідників, а також для точного внесення засобів захисту рослин. Це дозволяє оперативно реагувати на проблеми та зменшувати втрати врожаю.

Сенсорні технології включають сенсори, які вимірюють вологість, температуру, рівень поживних речовин у ґрунті та інші параметри, дозволяючи збирати великі обсяги даних для аналізу стану сільськогосподарських угідь та оптимізації процесів вирощування.

Інформаційні системи для аналізу даних обробляють зібрані сенсорами та дронами дані, використовуючи алгоритми машинного навчання та штучного інтелекту для прогнозування врожайності, оптимізації використання ресурсів та підвищення ефективності управління аграрними процесами.

Біотехнології та генетична інженерія відіграють важливу роль у створенні сортів та гібридів рослин, які краще адаптовані до автоматизованих методів вирощування, мають вищу врожайність та стійкість до хвороб.

Ці технології вже активно впроваджуються на передових аграрних підприємствах по всьому світу, і їх роль у подальшому розвитку автоматизації в сільському господарстві буде тільки зростати. Це дозволить не тільки підвищити ефективність виробництва, але й забезпечити більш сталий та екологічно чистий підхід.[17]

Інформаційні системи відіграють ключову роль у сучасному управлінні аграрними процесами, оскільки вони дозволяють збирати, обробляти, аналізувати та використовувати великі обсяги даних для прийняття обґрунтованих рішень. Впровадження інформаційних систем у сільському

господарстві сприяє підвищенню продуктивності, ефективності та сталості аграрного виробництва. Інформаційні системи дозволяють автоматизувати процес збору даних з різноманітних джерел, включаючи сенсори, дрони, супутникові знімки та інші, забезпечуючи оперативний доступ до актуальної інформації про стан угідь, врожайність, погодні умови та інші важливі параметри. Аналіз цих даних допомагає виявляти тенденції, прогнозувати врожайність та визначати оптимальні умови для вирощування культур.

На основі аналізу даних, інформаційні системи можуть надавати рекомендації щодо оптимізації аграрних процесів, таких як внесення добрив, полив, обробка від шкідників та хвороб, дозволяючи аграріям приймати обґрунтовані рішення, спрямовані на підвищення ефективності виробництва та зниження витрат. Інформаційні системи також сприяють автоматизації управлінських процесів, зокрема планування, бюджетування, контролю за виконанням робіт та управління ресурсами, забезпечуючи більшу прозорість та контроль за аграрними процесами, дозволяючи ефективно розподіляти ресурси та координувати діяльність на різних рівнях управління.

Завдяки можливостям аналізу великих обсягів даних, інформаційні системи допомагають прогнозувати майбутні тенденції та адаптуватися до змін умов виробництва, що є особливо важливим в умовах зміни клімату та зростаючої непередбачуваності погодних умов. Адаптація аграрних процесів на основі прогнозів дозволяє мінімізувати ризики та забезпечити стабільність виробництва. Інтеграція інформаційних систем з іншими системами управління, такими як логістичні, фінансові та маркетингові, забезпечує комплексний підхід до управління аграрним бізнесом, оптимізуючи всі аспекти діяльності підприємства та підвищуючи його конкурентоспроможність на ринку.

Перспективи розвитку автоматизації в сільському господарстві обіцяють бути динамічними та інноваційними, оскільки галузь продовжує інтегрувати новітні технології та підходи для підвищення ефективності та

сталості виробництва. Одним з ключових напрямків розвитку є подальше вдосконалення інтелектуальних систем управління, які здатні самостійно аналізувати великі обсяги даних, адаптуватися до змінних умов та оптимізувати різноманітні аграрні процеси.

Інтеграція автоматизованих систем з передовими технологіями, такими як штучний інтелект, машинне навчання та розширені аналітичні інструменти, дозволить аграріям не тільки збільшувати врожайність та знижувати витрати, але й впроваджувати більш сталі методи ведення сільського господарства. Це включає в себе раціональне використання водних ресурсів, мінімізацію використання хімічних добрив та пестицидів, а також зменшення впливу аграрного сектору на зміну клімату.[18]

Окрім того, розвиток автоматизації відкриває можливості для використання вторинної енергії, яка може бути отримана від різноманітних виробництв та процесів. Наприклад, використання тепла, що генерується промисловими підприємствами, для обігріву теплиць або виробництво біогазу з органічних відходів сільського господарства може стати ефективним способом зниження енергетичних витрат та зменшення вуглецевого сліду аграрного сектору. Автоматизація також сприятиме розвитку розумних енергетичних систем, які здатні оптимізувати споживання енергії та використовувати відновлювані джерела енергії, такі як сонячна та вітрова енергія, для забезпечення потреб сільськогосподарських підприємств. Це не тільки знизить залежність від традиційних джерел енергії, але й сприятиме створенню більш сталої та екологічно чистої аграрної індустрії.

Враховуючи ці перспективи, можна очікувати, що майбутнє автоматизації в сільському господарстві буде спрямоване на створення інтегрованих, ефективних та екологічно сталих систем, які зможуть відповідати викликам сучасності та забезпечувати високу продуктивність при мінімальному впливі на навколишнє середовище.

1.3 Аналіз технологічного процесу

Аміачна селітра, відома також як нітрат амонію (NH_4NO_3), є одним з найважливіших азотних добрив, що використовуються у сільському господарстві по всьому світу. Її виробництво в Україні має довгу історію та відіграє ключову роль у забезпеченні продовольчої безпеки країни.

Процес виробництва аміачної селітри включає кілька етапів. Починається він з синтезу аміаку, який отримують шляхом реакції водню з азотом за високого тиску та температури. Далі аміак реагує з азотною кислотою, утворюючи нітрат амонію. Цей розчин потім концентрують шляхом випаровування, після чого він гранулюється, сушиться, охолоджується та пакується для подальшого використання.[22]

Аміачна селітра має високий вміст азоту, що робить її ефективним добривом для забезпечення росту рослин. Вона містить азот у двох формах: амонійній та нітратній, обидві з яких легко засвоюються рослинами. Однак, аміачна селітра також має властивості, які можуть бути небезпечними. Вона є сильним окиснювачем і може вибухати при певних умовах, особливо якщо її неправильно зберігати або використовувати.

З огляду на ці ризики, безпека виробництва та використання аміачної селітри є пріоритетом. Важливо дотримуватися правил зберігання та обігу цього добрива, щоб запобігти можливим інцидентам. Також важливо розуміти вплив аміачної селітри на навколишнє середовище, оскільки її надлишок може призвести до забруднення ґрунтів та водойм.

Україна продовжує розвивати своє виробництво аміачної селітри, прагнучи до підвищення ефективності та безпеки процесів. Це не тільки сприяє зростанню внутрішнього аграрного сектору, але й забезпечує країну важливим ресурсом для підтримки продовольчої безпеки та економічного розвитку.[23]

Кожухотрубний теплообмінник представляє собою ключовий елемент у сфері промислового обладнання, зокрема в таких галузях, як хімічна промисловість та виробництво аміачної селітри. Ці теплообмінники

володіють унікальними конструктивними характеристиками, що дозволяють ефективно здійснювати тепловий обмін між різними середовищами - вона може бути рідиною або газом, забезпечуючи оптимізацію процесів нагрівання та охолодження в рамках виробничих потреб.

В основі кожухотрубних теплообмінників лежить система труб, укладених у спеціальний корпус. Один із теплоносіїв циркулює всередині цих труб, тоді як інший проникає через отвори, утворені простором між трубами, що дозволяє досягти максимальної ефективності теплового обміну завдяки прямому контакту теплоносіїв із металевими поверхнями.

Завдяки тому, що конструкція кожухотрубного теплообмінника дозволяє регулювати температурні умови в широкому діапазоні, вона підходить для застосування в процесах, де необхідний прискорений відведення тепла чи, навпаки, висока ефективність нагрівання. Теплообмін відбувається завдяки стінкам труб, які трансформують теплову енергію від одного теплоносія до іншого, адаптуючись до конкретних вимог технологічного процесу, що забезпечує гнучкість використання та високу продуктивність обладнання.

Виробництво аміачної селітри є складним процесом, що вимагає високотехнологічного обладнання та глибокого розуміння хімічних і фізичних процесів синтезу. Ключовим елементом є використання вторинної пари, яка відіграє важливу роль у теплообмінних системах. Вибір параметрів вторинної пари базується на ретельному аналізі технічних і економічних параметрів, що впливають на ефективність і вартість виробництва.

Основними факторами, що впливають на вибір вторинної пари, є її теплоємність та тиск у виробничих умовах. Низька теплоємність вторинної пари може призвести до необхідності збільшення площі поверхні обладнання, що, в свою чергу, значно підвищує вартість виробництва. Тому, вибір пари з тиском 4.5 атмосфери є оптимальним рішенням для цехових умов, оскільки такий тиск забезпечує необхідну ефективність теплопередачі без додаткових капіталовкладень у розширення теплообмінної площі.

Збільшення площі поверхні обладнання для теплообміну не лише призводить до зростання вартості, але й збільшує фізичні розміри установки, що може стати проблемою у випадку обмеженого простору виробничих приміщень. Оцінки показують, що вартість може зрости в чотири-п'ять разів вище, ніж при використанні вторинної пари з вищим тиском. Крім того, вторинна пара з низьким тиском вимагає додаткового обладнання для перекачування, що також збільшує загальні витрати на виробництво.

Використання низькотемпературного конденсату також не є економічно вигідним. Це пов'язано з необхідністю додаткових витрат на діарацію та передачу конденсату, а також з ризиком розривання трубопроводів через вторинне скипання конденсату, що може виникнути через зниження тиску та температури під час передачі.

Таким чином, стратегічне планування та вибір вторинної пари з вищим тиском дозволяє оптимізувати витрати на обладнання та експлуатацію, забезпечуючи при цьому високу ефективність процесу виробництва аміачної селітри. Це рішення є виправданим не лише з технічної, але й з економічної точки зору, оскільки забезпечує оптимальне співвідношення між вартістю та продуктивністю, що є ключовим для успішного та конкурентоспроможного виробництва.

1.4 Тепличний комплекс як об'єкт автоматизованого керування

У сучасних умовах розвитку аграрного виробництва тепличні господарства дедалі частіше розглядаються не лише як інженерні споруди для захисту рослин від несприятливих зовнішніх факторів, а як складні техніко-біологічні системи, у яких поєднуються теплотехнічні, автоматизаційні та інформаційні процеси. Забезпечення стабільного мікроклімату в теплиці є необхідною умовою отримання прогнозованого врожаю високої якості, проте водночас потребує значних енергетичних витрат, основна частка яких припадає на системи опалення. Саме тому

підвищення енергоефективності тепличних комплексів є одним із ключових напрямів їхнього технологічного розвитку.

У межах даної роботи теплиця розглядається як об'єкт автоматизованого керування, у якому теплозабезпечення реалізується на основі рекуперації вторинної технологічної теплової енергії. Такий підхід ґрунтується на використанні тепла, що утворюється в промислових технологічних процесах і зазвичай не використовується або втрачається в навколишнє середовище. Залучення вторинної технологічної пари до системи опалення теплиці дозволяє істотно знизити споживання первинних енергоресурсів, зменшити експлуатаційні витрати та підвищити загальну ефективність енергетичного балансу.



Рисунок 1.2 - Принципова схема використання вторинної технологічної пари для опалення теплиці.

Ключовим елементом такої системи є кожухотрубний теплообмінник, який виконує функцію теплотехнічної розв'язки між промисловим джерелом тепла та тепличним господарством. У теплообміннику теплота вторинної технологічної пари передається робочому теплоносію, що циркулює в замкненому контурі системи опалення теплиці. При цьому утворений у процесі теплопередачі конденсат відводиться та може бути повернутий у виробничий цикл, що додатково підвищує ресурсну ефективність системи. Така схема забезпечує безпечну інтеграцію промислового та аграрного об'єктів, мінімізуючи ризики прямого контакту технологічних середовищ.

У тепличному комплексі теплова енергія, отримана в теплообміннику, використовується для нагріву повітря та підтримання заданого температурного режиму в зоні росту рослин. Для цього застосовується система циркуляції теплоносія з використанням насосного обладнання, а також елементи повітророзподілу та вентиляції, які забезпечують рівномірний розподіл тепла по об'єму теплиці. Вентиляційні системи виконують подвійну функцію: з одного боку, вони підтримують температурний баланс, а з іншого забезпечують необхідний повітрообмін, запобігаючи надмірному накопиченню вологи та продуктів життєдіяльності рослин.

Важливою складовою системи є засоби контролю параметрів мікроклімату. Для безперервного моніторингу температури та вологості повітря використовуються цифрові датчики, зокрема DHT11 та DS18B20. Датчик DHT11 дозволяє здійснювати оперативний контроль температури та відносної вологості повітря й широко застосовується в задачах кліматичного моніторингу завдяки простоті інтеграції та достатній точності для аграрних застосувань. Датчик DS18B20 використовується для більш точного вимірювання температури та характеризується високою завадостійкістю завдяки цифровому протоколу передачі даних, що є особливо важливим в умовах наявності електромеханічного обладнання.[24]

Сигнали від вимірювальних датчиків надходять до мікропроцесорного контролера, зокрема на базі платформи ESP32, який виконує функції збору, обробки та передачі інформації, а також реалізує алгоритми автоматичного регулювання. Використання таких контролерів дозволяє організувати локальний контур керування з мінімальними затримками, що забезпечує швидке реагування системи на зміну параметрів середовища. Крім того, контролер забезпечує комунікацію з програмним рівнем системи керування, де здійснюється візуалізація параметрів, архівація даних і дистанційний доступ оператора.

Для віддаленого моніторингу та управління параметрами теплиці може застосовуватися IoT-платформа Blynk, яка забезпечує зручний інтерфейс доступу до даних у реальному часі. Інтеграція контролера ESP32 з IoT-платформою дозволяє реалізувати сучасні підходи до управління тепличним господарством, зокрема оперативне спостереження за станом мікроклімату, коригування режимів роботи системи та аналіз накопичених даних з метою подальшої оптимізації.

Завдяки автоматизації процесів збору та обробки інформації знижується потреба в постійному ручному контролі, підвищується точність регулювання та зменшуються ризики людського чинника. У результаті система керування теплицею функціонує як цілісний комп'ютерно-інтегрований комплекс, у якому теплотехнічні, вимірювальні та керувальні підсистеми взаємодіють у межах єдиного алгоритмічного простору.

Таким чином, використання кожухотрубного теплообмінника в поєднанні з автоматизованими системами контролю та мікропроцесорним керуванням створює передумови для ефективного використання вторинної теплової енергії та стабільного підтримання мікроклімату в теплиці.[24]

1.5 Вибір та характеристика культур для вирощування в тепличному господарстві

Вибір культур для вирощування в теплицях з підігрівальними кожухотрубними теплообмінниками, що використовують вторинну пару з виробництва аміачної селітри, є важливим аспектом для ефективного та рентабельного тепличного господарства. Сучасне тепличне виробництво, яке забезпечує незалежність від погодних умов і дозволяє досягати високої врожайності, потребує ретельного підбору культур, що мають високий попит та економічну вигоду.

За світовими прогнозами, у третьому тисячолітті рослинництво у розвинених країнах перейде під дах. Тепличне виробництво забезпечує незалежність від погодних та кліматичних умов, і врожайність продукції

значно вища, ніж у відкритому ґрунті. Сучасні теплиці є закритими екологічними системами, оснащеними світлопрозорим покриттям, системами штучного клімату, механізацією та автоматизацією технологічних процесів із застосуванням малооб'ємної технології вирощування рослин.

Для того щоб виростити овоч, фермер повинен забезпечити відповідні умови для рослини. Описані відносини між рослиною, ґрунтом, водою, атмосферою, світлом та іншими рослинами допоможуть зрозуміти причини появи рекомендацій у наступних частинах керівництва.

Ґрунт має безліч важливих ролей для рослин, таких як підтримка кореневої системи, забезпечення нутрієнтами (живильними речовинами) і водою, а також наповнення повітрям для кореневого дихання. Тому хороший ґрунт повинен мати особливі фізичні та хімічні властивості: частинки ґрунту утворюють структури, які заповнені водою та повітрям, що дозволяє кореням проникати і розвиватися (рис. 1.1).

Також ґрунт повинен бути багатим на азот (N), фосфор (P) і калій (K), які є головними поживними елементами для рослин. Ці елементи утворюються в процесі розкладання органічних речовин або додаються у вигляді добрив. Ґрунт повинен вміти зберігати ці елементи і поступово звільняти їх для рослин. Гумус і глина сприяють цьому процесу. [30]

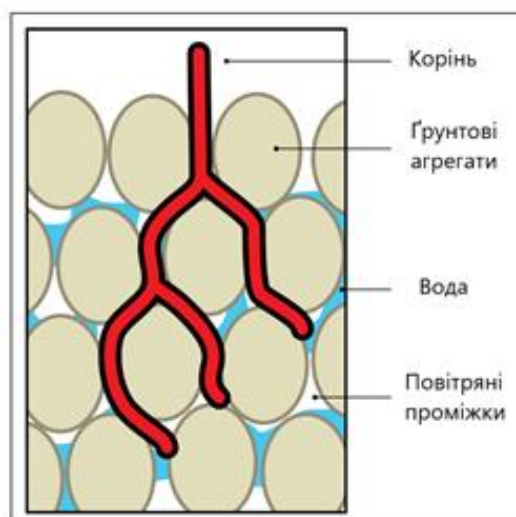


Рисунок. 1.3 – Структура ґрунту

Вода виконує три важливі функції: транспортує нутрієнти з ґрунту до рослини, переміщує елементи всередині рослини і сприяє її зростанню. Нестача води може призвести до загибелі рослини, тоді як надмірна кількість води може мати такий самий негативний результат.

Атмосфера необхідна рослині для дихання, фотосинтезу і випаровування. Дихання стосується всіх частин рослини, включаючи коріння. Надмірна кількість води може заповнити повітряні порожнини у ґрунті, що перешкоджає диханню коріння і може призвести до загибелі рослини. Фотосинтез полягає у поглинанні вуглекислого газу і виділенні кисню, що дозволяє рослині будувати органічні речовини за допомогою світла, атмосферного вуглекислого газу і елементів ґрунту (N, P, K). Відносна вологість також грає важливу роль у процесі випаровування. Якщо вона дуже висока, випаровування знижується, а якщо дуже низька, рослина захищає себе, обмежуючи випаровування, що сповільнює її зростання. Нормальною вважається вологість між 45% та 75%, яку можна контролювати за допомогою поливу чи вентиляції [29].

Світло необхідне для фотосинтезу, який сприяє зростанню рослини. Світловий ритм впливає на розвиток рослини, і нестача світла може спричинити пожовтіння листя.

Ґрунт, вода, атмосфера та світло є основними ресурсами для рослини (рис. 1.2). Ці ресурси повинні бути використані максимально ефективно в теплиці. Надмірна кількість рослин на маленькій ділянці може призвести до конкуренції за ресурси, що знизить врожайність.

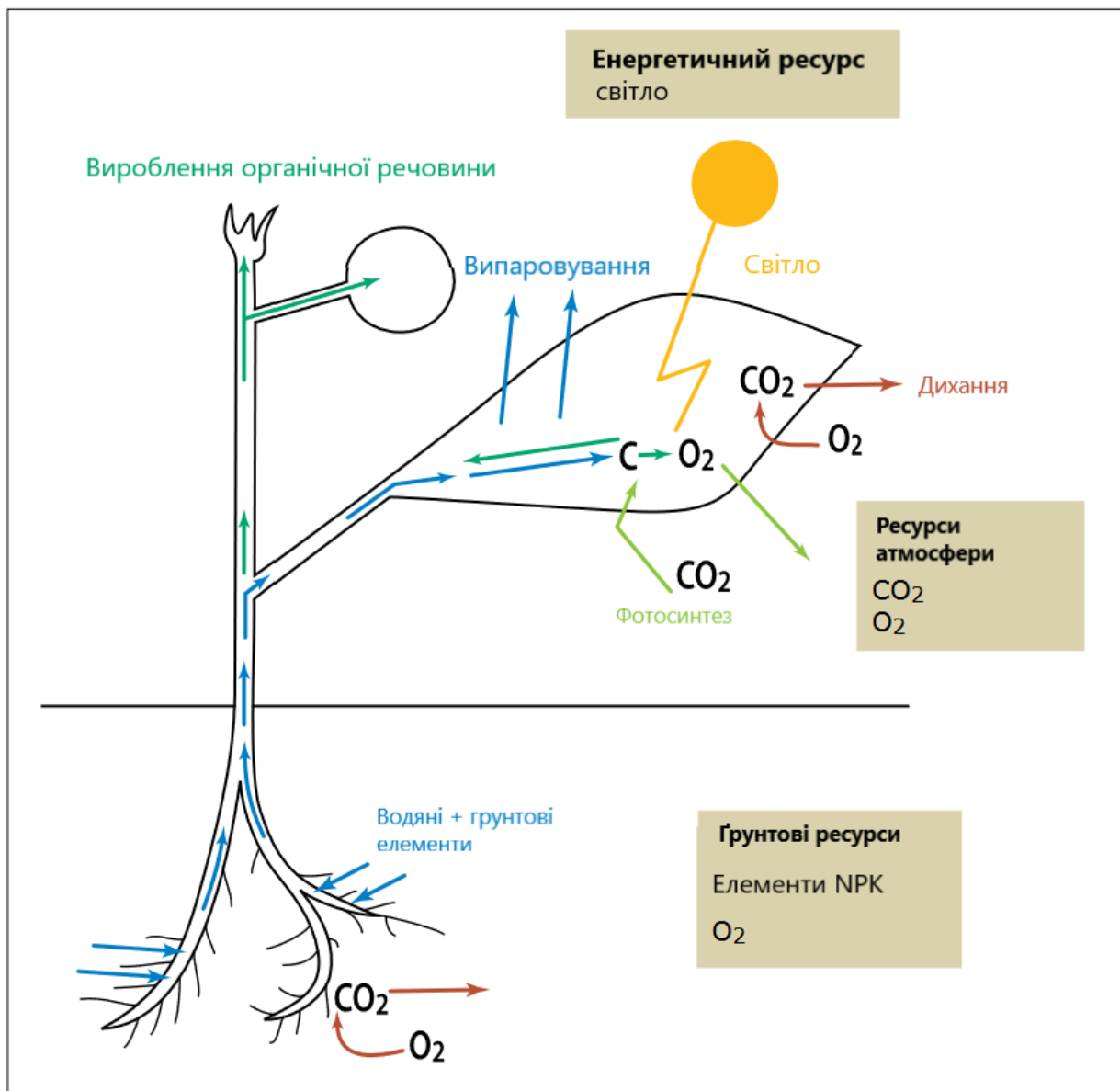


Рисунок. 1.4 – Відношення рослини з її навколишніми ресурсами

Ціль всього циклу розвитку рослини спрямоване на виробництво насіння. Протягом свого розвитку рослина сягає різні стадії. Умови (температура, світловий ритм, ґрунт) для досягнення кожної стадії залежить від виду та різноманітності культури. Збирання врожаю відбувається на різних стадіях залежно від призначення виробництва (листя, цибулина, корінь та фрукт). Чим більше стадії у виробничому циклі культури, тим більше труднощів при її догляді, тому що кожна стадія потребує певних умов. Урожай залежить від сприятливого результату досягнення кожної стадії.

Практика показує, що ливарні овочі легше виробляти, ніж кореневі овочі та фруктові. Тому ливарні овочі можуть рости щодо екстремальних умов.

Роль парника це створення сприятливих кліматичних умов (включаючи повітря, температури ґрунту та вологість) для культур. Звичайно клімат усередині парника змінюється в залежності від пори року та місце розташування.

Як повідомляє Державна служба статистики, у квітні вартість сезонних продуктів зросла на 8,5%, а у порівнянні із початком року – на 69%.[27]

На основі детального аналізу, проведеного для вибору оптимальних рослин, в автоматизованій теплиці було вирішено вибрати томати, зокрема гібрид індетермінантного типу "чері" Мінопріо F1, який відповідає вимогам високо продуктивності та якості плодів. Цей сорт є оптимальним вибором завдяки його швидкому вегетаційному періоду, який становить всього 65 днів. Рослини мають потужну структуру та гарну зав'язуваність плодів, що забезпечує високу врожайність. Крім того, ці томати відзначаються відмінною стійкістю до перепадів температури, що є дуже важливим фактором для забезпечення стабільного врожаю.

Мінопріо F1 має вирівняні пензли з плодами, які розташовані рівномірно. Це сприяє легкому збору врожаю та полегшує процес догляду за рослинами. Крім того, цей гібрид є сорт зі значною кількістю поживних речовин та вітамінів, що є корисним для здоров'я людини.[28]

Аналізуючи сучасні тенденції та попит на ринку, можна визначити, що одними з найбільш популярних і потрібних овочів є томати та огірки. Вони легко адаптуються до умов теплиці і мають короткий вегетаційний період, що дозволяє отримувати декілька урожаїв за рік. Крім того, ці культури мають високу врожайність і добре реагують на контрольовані умови середовища, що створюються в теплицях з використанням підігрівуючих теплообмінників.

Для успішного вирощування цих культур необхідно забезпечити оптимальні умови: підтримку відповідної температури, вологості, рівня освітлення та належного обміну повітря. Підігріваючі кожухотрубні теплообмінники, використовуючи вторинну пару з виробництва аміачної селітри, здатні ефективно підтримувати необхідний температурний режим у теплиці, що сприяє стабільному росту і розвитку рослин.

Важливим аспектом також є правильний підбір ґрунту та системи поливу. Ґрунт має бути багатий на основні поживні речовини - азот, фосфор та калій, а система поливу повинна забезпечувати рівномірний розподіл води та запобігати застою води, що може призвести до гниття кореневої системи.

Таким чином, вибір томатів Мінопріо F1 є оптимальним рішенням для автоматизованої теплиці, оскільки вони мають властивості, які забезпечують високу якість та кількість врожаю. Це забезпечить високу врожайність, стабільний прибуток та задоволення попиту на ринку.

1.6 Особливості мікроклімату та повітрообміну в теплиці

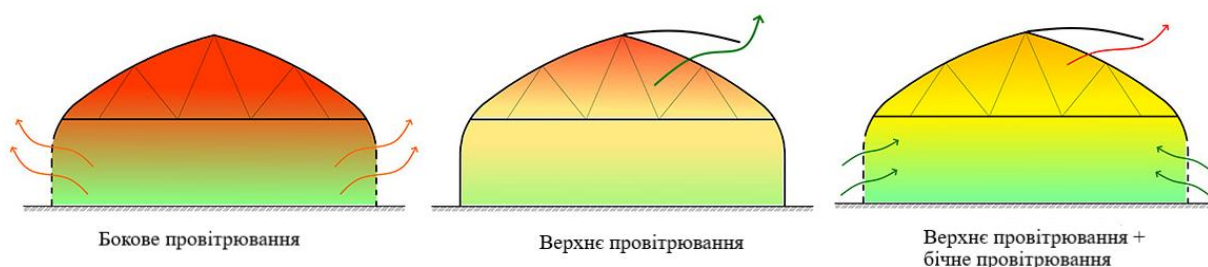


Рисунок. 1.5 – розподіл повітря в теплиці

Основною функцією будь-якої теплиці є створення і підтримка оптимального мікроклімату для вирощуваних рослин. До основних характеристик мікроклімату належать температура та відносна вологість повітря. При експлуатації теплиці, особливо в літній період, повітря всередині сильно нагрівається, іноді до 50. Це призводить до стресу у рослин,

уповільнення їх зростання, зниження врожайності та інших негативних наслідків, аж до загибелі рослин. Високі температури також негативно впливають на працездатність плівки, вона розм'якшується і подовжується, що значно знижує її міцність.

Для боротьби з перегрівом існує безліч способів, таких як фарбування плівки або зашторювання, але найбільш ефективним методом залишається провітрювання теплиці. На практиці застосовують різні варіанти провітрювання: бічне уздовж всієї теплиці, торцеве, розкриттям даху в середині теплиці та верхнє уздовж коника.

Простота і дешевизна пристрою бічного провітрювання привели до швидкого зростання популярності цього виду. У цьому випадку плівка на боці теплиці накручується на трубу, піднімаючись вгору і відкриваючи кватирку на висоту до 1,5–2,0 метра від ґрунту. Однак цей вид вентиляції не можна назвати найкращим, адже гаряче повітря піднімається вгору і накопичується під коником. Видавити його вниз до рівня кватирки і видалити досить складно. Відтак, найбільш раціонально використовувати бічне провітрювання як припливну вентиляцію в комбінації з іншими видами.

Торцеве провітрювання відкриває торці, включаючи верхню їх частину, що забезпечує ефективне видалення гарячого повітря з-під коника. Однак з ростом довжини теплиці зростає і нерівномірність температури повітря, що негативно впливає на продуктивність рослин.

Вентиляція розкриттям даху в середині теплиці має такий же недолік, як і торцеве провітрювання: істотну нерівномірність температури по довжині теплиці.

З точки зору ефективності видалення гарячого повітря і рівномірності мікроклімату, найкращим є верхнє провітрювання уздовж коника. Воно інтенсивно видаляє гаряче повітря по всій довжині теплиці і дозволяє

холодному зовнішньому повітрю відразу змішуватися з гарячим внутрішнім, запобігаючи температурному шоку у рослин.[16]

2. РОЗРОБКА ТА ДОСЛІДЖЕННЯ АВТОМАТИЗОВАНОЇ СИСТЕМИ РЕГУЛЮВАННЯ

2.1 Теоретичні дослідження математичних моделей системи опалення тепличного середовища

Кожухотрубні теплообмінники є одними з найбільш поширених пристроїв у хімічній технології. Вони знаходять застосування для різних процесів, таких як нагрівання і охолодження матеріальних потоків, конденсація пари та інші технологічні операції. Характеризуються вони наявністю значних відхилень параметрів по всій довжині, що свідчить про їхню велику інерційність та затримку реакційного часу. Показником ефективності таких теплообмінних апаратів є температура продукту на виході з теплообмінника, і основною метою управління є підтримання цієї температури на заданому рівні.

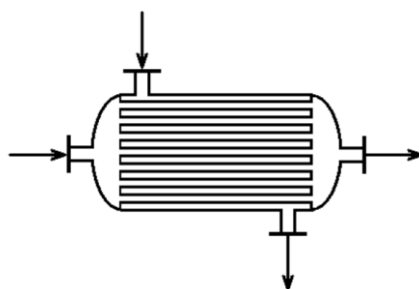


Рисунок 2.1 - Кожухотрубний теплообмінник

Конкретно кожухотрубний теплообмінник (показаний на рисунку 2.1) має одну основну характеристику - температуру нагрітого продукту на виході. Зазвичай у якості теплоносія використовується перегріта водяна пара, а іноді також застосовуються гаряча вода, органічні теплоносії з високою температурою або топкові газы. У цих типах теплообмінників теплота передається у двох етапах: спочатку від теплоносія до трубок, через які протікає нагрівальний продукт, а потім від трубок до самого продукту.

Отже, для опису теплового балансу в кожухотрубних теплообмінниках використовується система з двох рівнянь. Перше рівняння описує передачу тепла від теплоносія до трубок, які містять нагрівальний продукт. Цей процес

визначається параметрами теплоносія, такими як його температура, теплоємність та тепловий потік. Друге рівняння описує передачу тепла від трубок до нагрівального продукту і враховує параметри трубок, такі як їхня теплопровідність, площа поверхні та розташування. Рішення цієї системи рівнянь дозволяє визначити температуру продукту на виході з теплообмінника і забезпечити його підтримку на заданому рівні. Крім того, можуть бути враховані додаткові фактори, такі як теплові втрати, наявність ізоляції та інші технічні особливості, що впливають на ефективність теплообмінного процесу. Таким чином, система рівнянь теплового балансу відіграє важливу роль в проектуванні та експлуатації кожухотрубних теплообмінників, забезпечуючи оптимальне керування тепловими процесами і забезпечуючи ефективну роботу пристроїв хімічної технології.

$$dq_T = dq_{mT} + dq_{CT} \quad (2.1)$$

$$dq_P + dq_{CT} + dq_{mP} = dq'_P + dq_{BT}, \quad (2.2)$$

де dq_T – теплота, яка передається теплоносієм;

dq_{mT} – кількість теплоти, яка накопичується у матеріалі трубок;

dq_{CT} – теплота, яка передається від трубок до нагрівального розчину;

dq_P – теплота, яка приходить з вхідним потоком;

dq_{mP} – кількість теплоти, яка накопичується у нагрівальному розчині;

dq'_P – теплота, яка витрачається з вихідним потоком;

dq_{BT} – витрати теплоти у навколишнє середовище.

2.2 Розробка та аналіз математичних моделей процесу опалення тепличного середовища

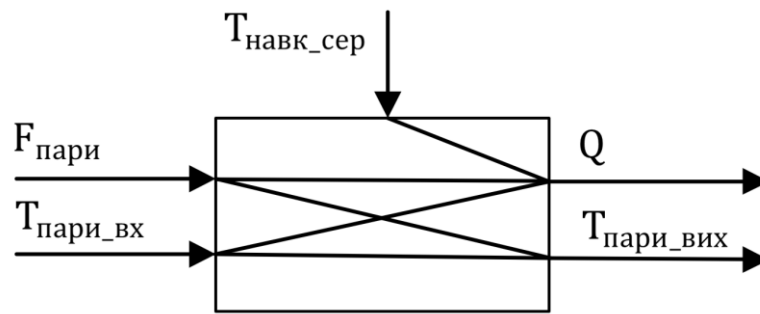


Рисунок 2.2 - Структурно-логічна схема

де $F_{\text{парі}}$ – Масові витрати пари;

$T_{\text{парі_вх}}$ – Температура вхідної пари;

$T_{\text{парі_вих}}$ – Температура вихідної пари;

Q – Кількість переданої теплової енергії;

$T_{\text{навк_сер}}$ – Температура навколишнього середовища;

Величина теплової енергії, що поступає до кожухотрубного теплообмінника, залежить від конкретного виду теплоносія, що використовується.

Якщо водяна пара виступає як теплоносій в кожухотрубному теплообміннику, то

$$dq_T = F_T r dt \quad (2.3)$$

де F_T - масові витрати пари;

r - теплота фазового переходу;

t – час

Для теплоносія у вигляді гарячої води, високотемпературного теплоносія або

топкових газів

$$dq_T = F_T \cdot C_T \cdot T_T \cdot dt \quad (2.4)$$

де C_T - теплоємність теплоносія;

T_T – температура теплоносія;

t – час.

Якщо теплообмінник має теплову ізоляцію на його поверхні, тоді втрати теплоти, позначені як dq_{BT} , є незначними і становлять приблизно (3-5)% від загальної кількості теплоти, яка надходить від теплоносія. Однак, якщо втрати теплоти до навколишнього середовища є значними, їх можна обчислити за допомогою наступної формули:

$$dq_{BT} = \alpha S (T_{CT} - T_0) dt \quad (2.5)$$

де α - коефіцієнт віддачі з поверхні теплообмінника;

S - його зовнішня поверхня;

T_{CT} - температура стінки;

T_0 - середня температура навколишнього середовища

Теплова енергія, яка накопичується у матеріалі трубок і нагрівуючій рідині, може бути визначена наступним чином:

$$dq_{mT} = m_{CT} C_{CT} dT_{CT}; dq_{mP} = m_P C_P dT_P \quad (2.6)$$

де m_{CT} , m_P - маса відповідно трубок і рідини у теплообміннику; C_{CT} ,

C_P - їх теплоємності; T_{CT} , T_P - температура стінки та рідини.

Теплота, яка витрачається з потоком рідини на виході теплообмінника:

$$dq_P = F_P C_P T_P dt \quad (2.7)$$

Кількість теплоти, яка приходить з вхідним потоком теплоносія, може бути обчислена згідно з наступною формулою:

$$dq_P = F_P C_P T_P dt \quad (2.8)$$

де T_P - температура рідини на вході теплообмінника.

Кількість теплоти, яка передається від стінки трубок до рідини шляхом тепловіддачі, може бути обчислена за наступною формулою:

$$dq_{CT} = \alpha S_{CT} (T_{CT} - T_P) dt \quad (2.9)$$

де α - коефіцієнт тепловіддачі від трубок до рідини;

S_{CT} - загальна поверхня трубок.

Складання загальної динамічної математичної моделі:

Тепловий баланс кожухотрубного теплообмінника може бути описаний системою рівнянь, де перше рівняння відображає баланс теплоти для теплоносія, а друге - для гріючого продукту. У випадку, коли теплоносієм є перегріта водяна пара, згідно з рівняннями (2.3), (2.5) ... (2.9), система рівнянь набуває наступного вигляду:

$$F_T r dt = m_{CT} C_{CT} dT_{CT} + \alpha S_{CT} (T_{CT} - T_p) dt \quad 2.10)$$

$$\begin{aligned} F_p C_p T_p dt + \alpha S_{CT} (T_{CT} - T_p) dt \\ = m_p C_p dT_p + F_p C_p T_p dt + dq_{BT} \end{aligned} \quad 2.11)$$

Після розділення цієї системи на dt дістанемо:

$$m_{CT} C_{CT} \frac{dT_{CT}}{dt} + \alpha S_{CT} T_{CT} = F_T r + \alpha S_{CT} T_p \quad 2.12)$$

$$m_p C_p \frac{dT_p}{dt} + F_p C_p T_p + \alpha S_{CT} T_p = F_p C_p T_p + \alpha S_{CT} T_{CT} \quad 2.13)$$

При цьому вважається, що втрати теплоти dq_{BT} є незначними і можуть бути проігноровані. Також припускається, що зміна теплоємностей C_{CT} , C_p і C_p є незначною і також може бути проігнорована. Крім того, припускається, що коефіцієнт тепловіддачі змінюється незначно. Сталі параметри включають масу стінок фазового переходу r і масу продукту у теплообміннику m_p .

Змінні параметри включають температуру стінки T_{CT} , температуру теплоносія T_T , витрату теплоносія F_T , температуру продукту на вході T_p і на виході теплообмінника, а також витрату F_p .

Змінні параметри об'єкта керування можна записати наступним чином:

$$T_{CT} = T_{CTO} + \Delta T_{CT}$$

$$F_T = T_{TO} + \Delta F_T$$

$$F_P = F_{PO} + \Delta F_P$$

$$T^*_P = T^*_{PO} + \Delta T^*_P$$

$$T_P = T_{PO} + \Delta T_P$$

Підставивши ці рівняння у (2.12) і (2.13), отримаємо наступні результати:

$$\begin{aligned} m_{CT} C_{CT} \frac{d(T_{CTO} + \Delta T_{CT})}{dt} + \alpha S_{CT} (T_{CTO} + \Delta T_{CT}) \\ = r(F_{TO} + \Delta F_T) + \alpha S_{CT} (T^*_{PO} + \Delta T^*_P) \end{aligned} \quad (2.14)$$

$$\begin{aligned} m_P C_P \frac{d(T^*_{PO} + \Delta T^*_P)}{dt} + C^*_P (F_{PO} + \Delta F_P) (T^*_{PO} + \Delta T^*_P) \\ + \alpha S_{CT} (T^*_{PO} + \Delta T^*_P) \\ = C_P (F_{PO} + \Delta F_P) (T_{PO} + \Delta T_P) + \alpha S_{CT} (T^*_{PO} + \Delta T^*_P) \end{aligned} \quad (2.15)$$

Після відповідного перемноження та знехтування складовими малої ваги, отримаємо наступне:

$$\begin{aligned} m_{CT} C_{CT} \frac{d\Delta T_{CT}}{dt} + \alpha S_{CT} T_{CTO} + \alpha S_{CT} \Delta T_{CT} \\ = r F_{TO} + r \Delta F_T + \alpha S_{CT} T^*_{PO} + \alpha S_{CT} \Delta T^*_P \end{aligned} \quad (2.16)$$

$$\begin{aligned} m_P C_P \frac{d\Delta T^*_P}{dt} + C^*_P F_{PO} T^*_{PO} + F_{PO} C^*_P \Delta T^*_P + C^*_P T^*_{PO} \Delta F_P + \\ \alpha S_{CT} T^*_{PO} + \alpha S_{CT} T^*_P = F_{PO} C_P T_{PO} + F_{PO} C_P \Delta T_{PO} + C_P T_{PO} \Delta F_P + \\ \alpha S_{CT} T_{CTO} + \alpha S_{CT} \Delta T_{CT} \end{aligned} \quad (2.17)$$

$$F_{TO} r = \alpha S_{CT} (T_{CTO} + T^*_{PO}) \quad (2.18)$$

$$\alpha S_{CT} (T_{CTO} + T^*_{PO}) + T_{PO} C_{PO} T_{PO} = F_{PO} C^*_P T^*_{PO} \quad (2.19)$$

$$m_{CT} C_{CT} \frac{d\Delta T_{CT}}{dt} + \alpha S_{CT} \Delta T_{CT} = r F_T + \alpha S_{CT} \Delta T^*_P \quad (2.20)$$

$$\begin{aligned} m_P C^*_P \frac{d\Delta T^*_P}{dt} + (F_{PO} + C^*_P + \alpha S_{CT}) \Delta T^*_P \\ = (C_P T_{PO} - C^*_P T^*_{PO}) \Delta T_P + \alpha S_{CT} \Delta T_{CT} \end{aligned} \quad (2.21)$$

Запишемо рівняння (2.20) і (2.21) у відносній формі, попередньо позначивши:

$$y_1 = \frac{\Delta T_{CT}}{T_{CTO}}; \quad y_2 = \frac{\Delta T^*_P}{T^*_{PO}}; \quad x_1 = \frac{\Delta F_T}{F_{TO}}; \quad x_2 = \frac{\Delta F_P}{F_{PO}}; \quad z = \frac{\Delta T_P}{T_{PO}}$$

В результаті отримаємо наступне:

$$m_{CT} C_{CT} T_{CTo} \frac{dy_1}{dt} + \alpha S_{CT} T_{CTo} + \alpha S_{CTo} y_1 = r F_{To} x_1 + \alpha S_{CT} T_{po} + \alpha S_{CT} \Delta T_p y_2 \quad (2.22)$$

$$\begin{aligned} m_p C_p T_{po} \frac{dy_2}{dt} + F_{po} C_p + \alpha S_{CT} T_{po} y_2 \\ = (C_p T_{po} - C_p T_{po}) F_{po} x_2 + F_{po} C_p T_{po} z + \alpha S_{CT} T_{CTo} y_1 \end{aligned} \quad (2.23)$$

Розділимо рівняння (2.22) на $\alpha S_{CT} T_{CTo}$, а (2.23) на $F_{po} C_p + \alpha S_{CT} T_{po}$ і введемо такі позначення:

$$\begin{aligned} \tau_1 &= \frac{m_{CT} C_{CT}}{\alpha S_{CT}}; \tau_2 = \frac{m_p C_p}{F_{po} C_p + \alpha S_{CT}}; K_1 = \frac{r F_{To}}{\alpha S_{CT} T_{CTo}}; K_2 \\ &= \frac{\alpha S_{CT} T_{CTo}}{(F_{po} C_p + \alpha S_{CT}) T_{po}}; \\ K_3 &= \frac{(C_p T_{po} - C_p T_{po})}{(F_{po} C_p + \alpha S_{CT}) T_{po}}; K_4 = \frac{F_{po} C_p T_{po}}{(F_{po} C_p + \alpha S_{CT}) T_{po}}; \\ K_4 &= \frac{\alpha S_{CT} T_{CTo}}{(F_{po} C_p + \alpha S_{CT}) T_{po}}. \\ \tau_1 \frac{dy_1}{dt} + y_1 &= K_1 x_1 + K_2 y_2 \end{aligned} \quad (2.24)$$

$$\tau_2 \frac{dy_2}{dt} + y_2 = K_3 x_2 + K_4 z + K_5 y_1 \quad (2.25)$$

Оскільки температура T_{CT} стінки є проміжним параметром, її потрібно вилучити із рівняння (2.23). Для цього необхідно розв'язати рівняння відносно вихідної величини y_2 . З рівняння (2.25) знайдемо y_1 :

$$y_1 = \frac{\tau_2}{K_5} \frac{dy_2}{dt} + \frac{1}{K_5} y_2 - \frac{K_3}{K_5} x_2 - \frac{K_4}{K_5} z \quad (2.26)$$

$$\frac{dy_1}{dt} = \frac{\tau_2}{K_5} \frac{d^2 y_2}{dt^2} + \frac{1}{K_5} \frac{dy_2}{dt} - \frac{K_3}{K_5} \frac{dx_2}{dt} - \frac{K_4}{K_5} \frac{dz}{dt} \quad (2.27)$$

Підставивши рівняння (2.26) і (2.27) у (2.24), отримаємо наступне:

$$\begin{aligned} \tau_1 \tau_2 \frac{d^2 y_2}{dt^2} + (\tau_1 + \tau_2) \frac{dy_2}{dt} + (1 - K_2 K_5) y_2 \\ = K_1 K_5 x_1 + \left(\tau_1 K_3 \frac{dx_2}{dt} + K_3 x_2 \right) + \left(\tau_1 K_4 \frac{dz}{dt} + K_4 z \right) \end{aligned} \quad 2.28)$$

Введемо додаткові позначення:

$$\tau' = \frac{\tau_1 + \tau_2}{1 - K_2 K_5}; \quad \tau'' = \frac{\tau_1 \tau_2}{1 - K_2 K_5}; \quad K_7 = \frac{K_3}{1 - K_2 K_5}; \quad K_8 = \frac{K_4}{1 - K_2 K_5}$$

Тоді математична модель кожухотрубного теплообмінника може бути виражена наступними рівняннями:

$$\tau'' \frac{d^2 y_2}{dt^2} + \tau' \frac{dy_2}{dt} + y_2 = K_6 x_1 + K_7 \left(\tau_1 \frac{dx_2}{dt} + x_2 \right) + K_8 \left(\tau_1 \frac{dz}{dt} + z \right) \quad 2.29)$$

Передавальні функції об'єкта керування з урахуванням часу запізнення за каналом регулювання можуть бути виражені наступним чином:

$$W_p(s) = \frac{K_6}{\tau'' s^2 + \tau' s + 1} e^{-\tau_1 s} \quad (2.30)$$

Таким чином розроблено та проаналізовано математичні моделі процесу опалення тепличного середовища за допомогою кожухотрубного теплообмінника. Проведений аналіз дозволив визначити ключові параметри, такі як кількість переданої теплової енергії та вплив температури навколишнього середовища. Результати підкреслюють важливість врахування теплових втрат і можливих збурень для підтримання стабільної температури в теплиці. Отримані моделі слугуватимуть основою для подальшого вдосконалення системи керування опаленням, що сприятиме оптимальним умовам вирощування рослин у тепличному середовищі.

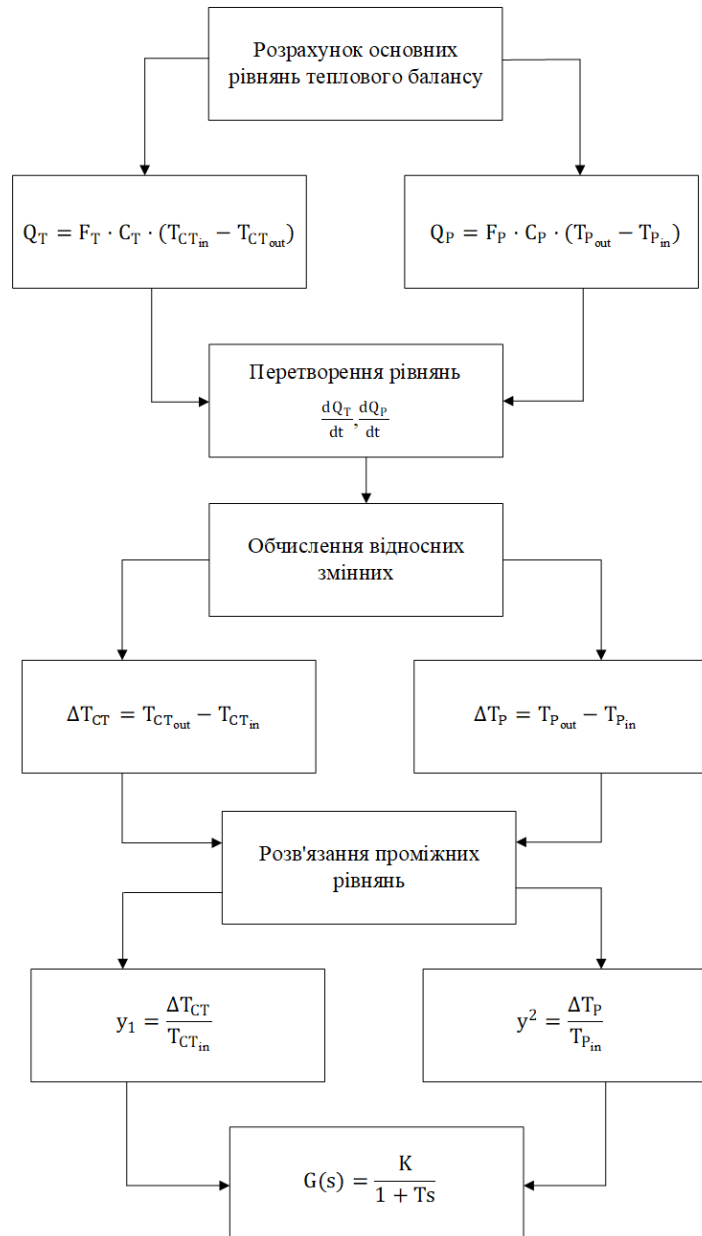


Рисунок. 2.3 – Інформаційно-логічна схема

2.3 Розрахунок теплотехнічних параметрів системи опалення теплиці з кожухотрубним теплообмінником

Задані параметри:

Температура в теплиці на початку: 16°C

Температура в теплиці після підігріву: 22°C

Розміри теплиці: довжина 15 м, ширина 7 м, висота 2.5 м

Тиск гріючої пари: трохи більше атмосферного, приймемо 1.05 атм

Температура на виході з теплообмінника: 18-20°C

Швидкість повітря в теплообміннику: 1.5-2 м/с

Час повного обміну повітря: 40 хвилин.

Об'єм теплиці V можна розрахувати за формулою:

$$V = l \cdot w \cdot h \quad (2.31)$$

де l – довжина,

де w – ширина

де h – висота

$$V = 15 \cdot 7 \cdot 2.5 = 262.5 \text{ м}^3$$

Необхідна кількість теплоти:

Необхідна кількість теплоти Q для нагрівання повітря може бути визначена за формулою:

$$Q = c_p \cdot \rho \cdot V \cdot \Delta T \quad (2.32)$$

де c_p – питома теплоємність повітря (1005 Дж/(кг·К)),

ρ – густина повітря (приблизно 1.225 кг/м³ при 20°C),

ΔT – різниця температур.

$$\Delta T = 22^\circ\text{C} - 16^\circ\text{C} = 6^\circ\text{C}$$

$$Q = 1005 \cdot 1.225^3 \cdot 262.5^3 \cdot 6 = 1944818.75$$

Масовий потік рідини F_{po} можна розрахувати, знаючи необхідну кількість теплоти та властивості пари. Припустимо, що теплота пароутворення води λ становить приблизно 2260 кДж/кг при 100°C.

$$F_{po} = \frac{Q}{\lambda} \quad (2.33)$$

де Q – кількість теплоти, необхідна для пароутворення (в Дж)

λ – теплота пароутворення (в Дж/кг)

$$F_{po} = \frac{1944818.75}{2260000} \approx 0.86$$

Таким чином, для підтримки заданої температури в теплиці потрібен масовий потік рідини приблизно 0.86 кг/с.

Початкова температура пари:

Враховуючи, що теплообмінник використовує пару як теплоносію, температура пари на вході в теплообмінник (T_{po}) повинна бути достатньо високою, щоб забезпечити необхідний тепловий потік. Зазвичай, для пари з тиском трохи вище атмосферного ($P_n = 1.05$ атм), температура насичення може бути близько 100°C або вище.

початкова температура повітря, що підігрівається в кожухотрубному теплообміннику для нагрівання, становить $T_{po} = 16^\circ\text{C}$, а кінцева температура після процесу нагрівання $T_{po1} = 22^\circ\text{C}$.

Площа теплообміну A потрібна для передачі теплоти Q може бути визначена за формулою:

$$A = \frac{Q}{k \cdot \Delta T_m} \quad (2.34)$$

де k – коефіцієнт теплопередачі, ΔT_m – середньологарифмічна різниця температур. Припустимо, що $k=100$ (приблизне значення для водяної пари), а $\Delta T_m = 5^\circ\text{C} = 5\text{K}$.

$$A = \frac{1944818.75}{100 \cdot 5} \approx 3890$$

Розрахунок кількості трубок N та довжини трубок l :

Площа теплообміну однієї трубки:

$$A_2 = \pi \cdot d \cdot l \quad (2.35)$$

де $d = 0.016$ (внутрішній діаметр трубки).

Припустимо, що загальна площа теплообміну розподілена між N трубками:

$$N = \frac{A}{A_2} = \frac{3890}{\pi \cdot 0.016 \cdot 1.5} \approx 513$$

Отже, для розрахунку, якщо довжина трубок становить 1.5, кількість трубок буде близько 513.

Загальна площа теплообміну, яка розподілена між усіма трубками, визначається як:

$$S_{ct} = N \cdot A = N \cdot \pi \cdot d \cdot l \quad (2.36)$$

Згідно з даними, питома теплоємність латунних теплопередаючих трубок кожухотрубного теплообмінника становить:

$$C_{ct} = 0.4 \text{ кДж}/(\text{кг} \cdot ^\circ\text{C})$$

Ця величина характеризує кількість теплоти, яку необхідно підвести до 1 кг матеріалу трубок, щоб підвищити його температуру на 1°C . Вона використовується при розрахунку кількості теплоти, що накопичується в матеріалі трубок під час процесу теплообміну.

Для розрахунку маси пари в системі кожухотрубного теплообмінника, який використовується для нагрівання повітря в теплиці за допомогою водяної пари, необхідно визначити об'єм повітря, який буде нагріватися, та використати густину повітря для обчислення маси.

Густина повітря залежить від температури та тиску. Для розрахунків використовуємо середнє значення густини повітря при нормальних умовах яке становить $1.225 \text{ кг}/\text{м}^3$.

Маса повітря m_p визначається як добуток густини повітря на об'єм:

$$m_p = \rho \cdot V \quad (2.37)$$

де ρ – густина повітря,

V – об'єм.

$$m_p = 1.2 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3} \cdot 262.5 \text{ м}^3 = 315 \text{ кг}$$

Отже, маса повітря, яка буде нагріватися в теплиці за допомогою кожухотрубного теплообмінника, становить приблизно 315 кг.

Коефіцієнт тепловіддачі від стінки трубок до повітря у кожухотрубному теплообміннику, становить

$$\alpha = 13.7 \text{ кДж}/(\text{м}^2 \cdot \text{с} \cdot ^\circ\text{C}).$$

Теплота фазового переходу r для водяної пари у кожухотрубному теплообміннику для нагрівання повітря, становить $2095 \text{ кДж}/\text{кг}$.

2.4 Аналіз автоматизованих систем керування мікрокліматом з рекуперацією тепла та формування завдань роботи

Автоматизовані системи керування мікрокліматом тепличних комплексів є ключовим елементом сучасного інтенсивного агровиробництва, оскільки саме вони забезпечують стабільність умов вирощування незалежно від зовнішніх кліматичних факторів. На відміну від традиційних підходів, де регулювання параметрів середовища здійснювалося переважно вручну або за допомогою простих регуляторів, сучасні тепличні комплекси функціонують як складні техніко-технологічні системи з багаторівневою структурою керування.

Основними параметрами мікроклімату, що підлягають автоматизованому контролю та регулюванню, є температура повітря, відносна вологість, концентрація вуглекислого газу, інтенсивність освітлення та повітрообмін. Між цими параметрами існує тісний взаємозв'язок: зміна одного з них неминуче впливає на інші, що ускладнює задачу керування та вимагає комплексного підходу до формування алгоритмів регулювання.

У практиці проєктування автоматизованих систем керування мікрокліматом застосовуються як локальні регулятори окремих параметрів, так і комп'ютерно-інтегровані системи, що об'єднують усі контури керування в єдину ієрархічну структуру. Такий підхід дозволяє розділити функції між рівнями системи, забезпечивши автономність локальних контурів регулювання та централізований нагляд і координацію на програмному рівні.

Особливе місце в автоматизованих системах керування мікрокліматом займає температурний режим, оскільки саме він визначає енергоспоживання тепличного комплексу та значною мірою впливає на фізіологічні процеси росту рослин. Підтримання стабільної температури в теплиці вимагає значних витрат теплової енергії, особливо в умовах холодного клімату або міжсезонних періодів. У зв'язку з цим актуальним напрямом розвитку

тепличних технологій є використання рекуперації тепла як способу підвищення енергоефективності системи опалення.

Рекуперація тепла в тепличних комплексах полягає у повторному використанні теплової енергії, яка в іншому випадку втрачалася б у навколишнє середовище. Джерелами вторинного тепла можуть бути технологічні процеси промислових підприємств, відпрацьовані гази, вентиляційні викиди або теплові потоки від суміжних енергетичних систем. Інтеграція таких джерел у систему опалення теплиці здійснюється, як правило, через теплообмінні апарати, що забезпечують передачу теплової енергії теплоносію тепличного контуру.

З точки зору систем керування, використання рекуперації тепла суттєво ускладнює теплотехнічну структуру об'єкта. На відміну від класичних систем опалення з одним керованим джерелом тепла, у системах з рекуперацією з'являються додаткові теплові потоки, змінні режими роботи джерел та обмеження, пов'язані з нестабільністю вторинного тепла. Це вимагає адаптації алгоритмів керування та врахування динамічних властивостей як тепличного контуру, так і теплообмінного обладнання.

Аналіз існуючих автоматизованих систем керування показує, що ефективно використання рекуперації тепла можливе лише за умови тісної інтеграції теплотехнічної частини з алгоритмами регулювання. Просте підключення додаткового джерела тепла без відповідної адаптації системи керування не гарантує зниження енергоспоживання та може призводити до нестабільності температурного режиму. Саме тому в сучасних комп'ютерно-інтегрованих системах керування все більшого значення набуває використання математичних моделей процесу як основи для формування керуючих впливів.

Комп'ютерно-інтегровані методи керування дозволяють поєднати теплотехнічну модель теплиці з алгоритмами регулювання та програмними засобами візуалізації й аналізу. Наявність математичного опису процесу

створює можливість прогнозування поведінки системи, оцінки впливу збурень та вибору оптимальних режимів роботи ще на етапі моделювання. Це особливо важливо для систем з рекуперацією тепла, де динаміка теплових процесів має виражений інерційний характер.

Таким чином, аналіз автоматизованих систем керування мікрокліматом тепличних комплексів із використанням рекуперації тепла свідчить про необхідність комплексного підходу, що поєднує теплотехнічні, алгоритмічні та програмні аспекти. Побудова ефективної системи керування вимагає чіткого формалізованого опису об'єкта, вибору адекватних алгоритмів регулювання та використання комп'ютерно-інтегрованих засобів для реалізації та аналізу режимів роботи.

На основі проведеного аналізу формується коло завдань, розв'язання яких забезпечує досягнення мети даної роботи.

Формування завдань роботи

З урахуванням особливостей автоматизованого керування мікрокліматом тепличних комплексів та використання рекуперації тепла в межах даної роботи передбачається розв'язання таких основних завдань:

- узагальнити принципи побудови автоматизованих та комп'ютерно-інтегрованих систем керування мікрокліматом тепличних комплексів;
- проаналізувати місце та роль рекуперації тепла в системах опалення теплиць з точки зору керованості та енергоефективності;
- розробити математичну модель теплотехнічного контуру тепличного комплексу з урахуванням процесів рекуперації тепла;
- виконати аналіз динамічних властивостей моделі та визначити параметри, що найбільше впливають на температурний режим;
- сформулювати алгоритм комп'ютерно-інтегрованого керування температурою в теплиці з використанням регуляторів температурного режиму;

- реалізувати модель та алгоритми керування в програмному середовищі з можливістю візуалізації та задання уставок;
- здійснити моделювання роботи системи керування в статичних і динамічних режимах;
- виконати аналіз отриманих результатів та оцінити ефективність використання рекуперації тепла в системі керування мікрокліматом тепличного комплексу.

Сформульовані завдання визначають подальшу структуру роботи та забезпечують логічний перехід від аналізу існуючих підходів до розробки математичної моделі, алгоритмів керування та програмної реалізації системи.

2.4.1 Екологічні та безпекові аспекти використання рекуперації тепла в системі керування мікрокліматом тепличного комплексу

У межах даної роботи використання рекуперації тепла розглядається як складова інженерної системи керування мікрокліматом тепличного комплексу, спрямована на підвищення енергоефективності та зменшення споживання первинних енергетичних ресурсів. Такий підхід відповідає сучасним тенденціям розвитку агропромислових систем, у яких пріоритет надається раціональному використанню вторинних енергетичних ресурсів та зниженню екологічного навантаження без погіршення технологічних умов вирощування рослин.

Рекуперація тепла в даному проєкті не передбачає технологічної інтеграції тепличного комплексу з основним промисловим виробництвом. Передача теплової енергії здійснюється виключно через теплообмінний апарат із використанням незалежних контурів теплоносія, що забезпечує повне фізичне та функціональне розділення середовищ. Таким чином, у тепличний контур передається лише тепла енергія, без перенесення газових, рідинних або твердих компонентів промислового процесу. Це є принциповою умовою екологічної безпеки та збереження якості внутрішнього середовища теплиці.

З екологічної точки зору використання рекуперованого тепла дозволяє суттєво знизити потребу в додаткових джерелах опалення, що традиційно забезпечуються за рахунок спалювання палива або використання електроенергії. Для тепличних комплексів, які характеризуються високою питомою тепловою потребою, така схема створює передумови для зменшення викидів парникових газів і підвищення загальної сталості виробництва. У наукових публікаціях і прикладних проєктах рекуперація промислового тепла для опалення теплиць розглядається як ефективний інструмент зниження енергетичних витрат за умови правильного вибору температурного рівня теплоносія, теплообмінного обладнання та системи керування.[35]

Окремої уваги вимагають питання безпеки, особливо у випадках, коли джерелом вторинного тепла є об'єкти підвищеної техногенної небезпеки, зокрема підприємства з виробництва або зберігання мінеральних добрив. У таких умовах безпечність впровадження рекуперації визначається не лише конструктивними рішеннями теплотехнічного контуру, а й організаційними та просторовими факторами.[34] У сучасній практиці ці питання вирішуються через застосування принципів санітарно-захисного зонування та оцінки ризиків, що передбачають розміщення чутливих об'єктів (до яких належать тепличні комплекси) поза межами зон потенційного впливу основного виробництва.

Нормативні матеріали та довідкові джерела, що регламентують розміщення складів і виробничих об'єктів, пов'язаних з аміачною селітрою та іншими мінеральними добривами II типу, вказують на мінімальні санітарно-захисні розриви порядку 400 м для об'єктів із відносно обмеженими обсягами зберігання. Зі збільшенням потужності або класу небезпеки підприємства ці розриви можуть зростати до 500 м і більше. У межах даної роботи значення 400 м використовується як орієнтовна мінімальна межа, що відображає загальні підходи до просторового

розмежування та дозволяє сформувати рамкове уявлення про безпечне розташування тепличного комплексу відносно джерела тепла. Остаточні параметри розміщення в реальних проєктах мають визначатися на основі чинних нормативів і результатів інженерно-екологічної оцінки для конкретного об'єкта.[33]

Важливо підкреслити, що у запропонованій системі ключову роль у забезпеченні безпечної експлуатації відіграє комп'ютерно-інтегрована система керування. Засоби автоматизованого контролю дозволяють у реальному часі відстежувати температурні та гідравлічні параметри теплового контуру, фіксувати відхилення від заданих режимів і реалізовувати алгоритми обмеження або відключення подачі тепла.[32] Таким чином, безпека системи забезпечується не лише на рівні просторового планування, але й на рівні експлуатаційного управління, що є особливо важливим для динамічних теплотехнічних процесів.

У контексті даної роботи екологічні та безпекові аспекти рекуперації тепла розглядаються як вихідні умови побудови системи керування, які визначають вимоги до структури теплотехнічного контуру, математичної моделі та алгоритмів регулювання. Такий підхід дозволяє інтегрувати рекуперацію тепла в систему керування мікрокліматом тепличного комплексу без порушення екологічної рівноваги та з дотриманням принципів безпечної експлуатації.

2.4.2 Інтеграція методів комп'ютерного зору як джерела зворотного зв'язку в комп'ютерно-інтегрованих системах тепличних комплексів

У сучасних комп'ютерно-інтегрованих системах керування тепличними комплексами все більшого значення набувають методи, що дозволяють оцінювати не лише фізичні параметри середовища, але й безпосередній стан рослин та продукції. Традиційні сенсорні системи забезпечують вимірювання температури, вологості, концентрації CO₂ та освітленості, однак ці параметри є опосередкованими індикаторами

ефективності керування. Реакція рослин на умови мікроклімату часто має інерційний, нелінійний і видовоспецифічний характер, що ускладнює своєчасне виявлення стресових станів лише на основі фізичних вимірювань.

Одним із перспективних напрямів розширення функціональності комп'ютерно-інтегрованих систем керування є застосування методів комп'ютерного зору, які дозволяють формувати так звані біологічні індикатори стану тепличних культур. На відміну від класичних датчиків, системи комп'ютерного зору аналізують візуальну інформацію про рослини та плоди, забезпечуючи прямий зв'язок між умовами вирощування та фактичним станом продукції, що істотно підвищує інформативність зворотного зв'язку в системі керування.

У тепличних комплексах камери можуть бути розміщені над рядами рослин, у зонах збору врожаю або на сортувальних і пакувальних лініях. Потік зображень, отриманий у реальному часі, обробляється алгоритмами комп'ютерного зору, які виконують задачі детекції, класифікації та локалізації об'єктів. Це дозволяє автоматично ідентифікувати плоди, оцінювати ступінь їх стиглості, виявляти дефекти поверхні, механічні пошкодження або візуальні ознаки захворювань. Результати такого аналізу подаються у вигляді кількісних параметрів і подій, які можуть бути інтегровані в систему керування поряд із традиційними вимірювальними даними мікроклімату.

Як приклад практичної реалізації подібного підходу в межах даної роботи розглядається модель детекції плодів томатів за ступенем стиглості та станом поверхні, апробована під час переддипломної практики. Для реалізації задачі комп'ютерного зору було використано одностадійну нейромережеву модель сімейства YOLO (You Only Look Once), яка є однією з найбільш поширених архітектур для задач детекції об'єктів у реальному часі. Моделі типу YOLO поєднують високу швидкість з достатньо високою точністю локалізації та класифікації, що робить їх придатними для

застосування в промислових тепличних комплексах із безперервним відеопотоком.

Навчальний набір даних формувався з зображень, отриманих у реальних умовах теплиці, які характеризувалися змінним природним та штучним освітленням, неоднорідним фоном, відблисками на поверхні плодів і частковими перекриттями томатів листям та стеблами. Анотування даних виконувалося у форматі прямокутних рамок (bounding boxes) з прив'язкою до класів, що відображають стан плоду, зокрема: незрілий, стиглий та дефектний. Такий підхід дозволив сформувати репрезентативну вибірку для навчання моделі в умовах, наближених до реальної експлуатації.

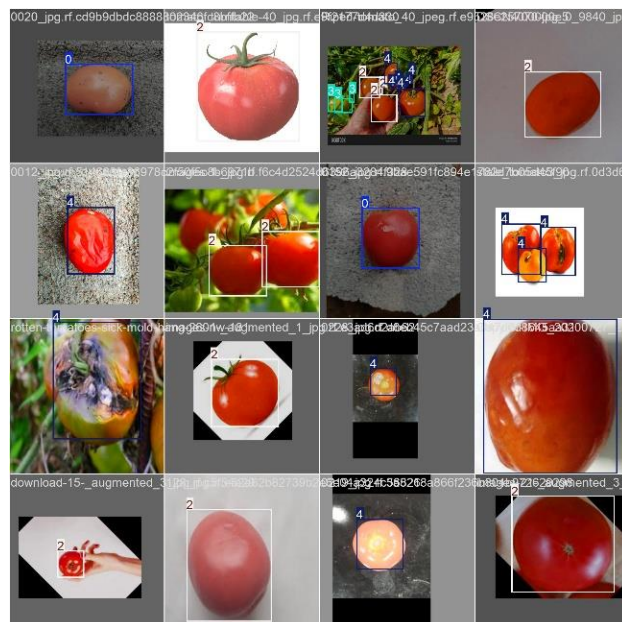


Рисунок 2.4 - Приклад анованих зображень навчальної вибірки для моделі комп'ютерного зору

Валідація моделі здійснювалася на відкладеній вибірці з метою оцінки узагальнювальної здатності алгоритму. Аналіз динаміки навчання показав стабільне зменшення функцій втрат для задач локалізації та класифікації, а також наближення основних метрик якості до плато, що свідчить про коректний підбір гіперпараметрів і достатню репрезентативність навчальних даних. Отримані результати підтверджують здатність моделі коректно працювати в умовах, характерних для тепличного виробництва.

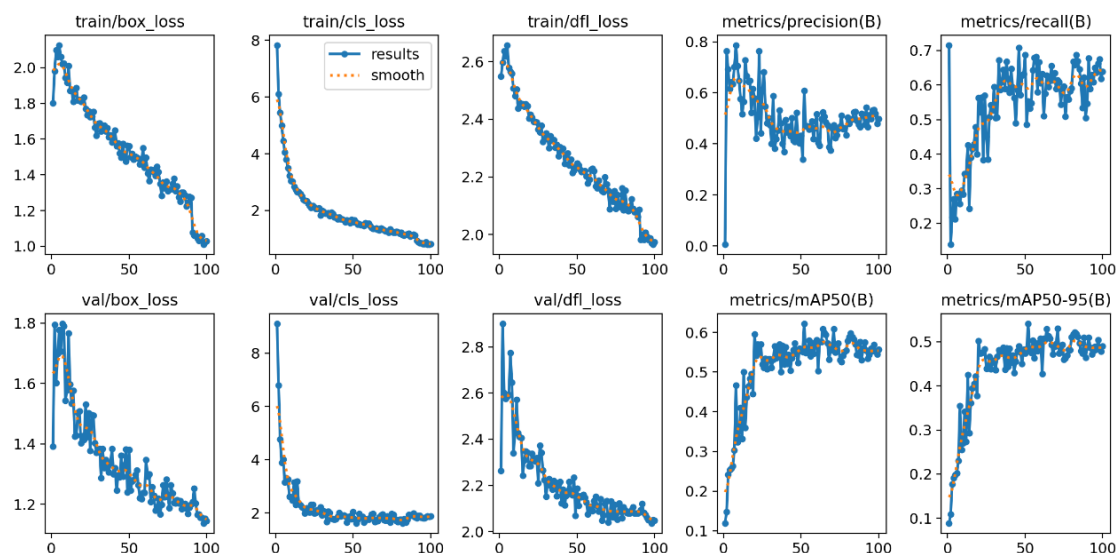
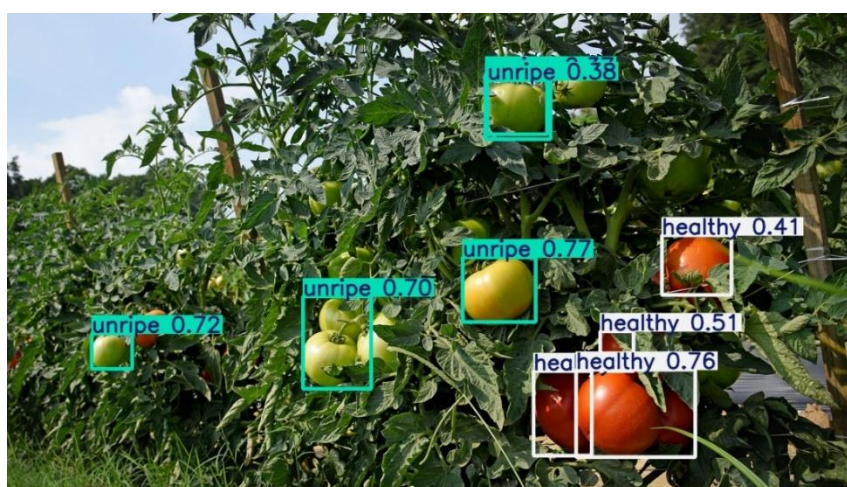


Рисунок 2.5 - Динаміка навчання моделі детекції

Практична перевірка роботи алгоритму на реальних сценах із теплиці продемонструвала його стійкість до змін освітлення, наявності відблисків та накладань плодів. Модель забезпечує не лише ідентифікацію об'єктів, але й формує числову оцінку впевненості детекції, яка може використовуватися для адаптивного налаштування порогів прийняття рішень у системі



керування.

Рисунок 2.6 - Результати роботи моделі комп'ютерного зору в реальних умовах теплиці

Це є особливо важливим у виробничих умовах, де необхідно мінімізувати кількість хибних спрацювань.

З позицій комп'ютерно-інтегрованої системи керування результати обробки візуальної інформації доцільно розглядати як окремий рівень даних, що доповнює класичні вимірювання мікроклімату. Вихідні дані підсистеми комп'ютерного зору можуть бути агреговані у формі подій та числових тегів, зокрема таких показників, як частка плодів певного класу в межах контрольної зони, середній індекс стиглості продукції, динаміка появи дефектних екземплярів або інтенсивність змін візуальних характеристик у часі. На рівні SCADA ці параметри передаються з використанням стандартних промислових протоколів обміну даними та відображаються на операторських панелях разом із температурою, вологістю, концентрацією CO₂ та іншими технологічними змінними, формуючи єдине інформаційне середовище для аналізу стану тепличного комплексу.

Включення біологічно орієнтованих індикаторів у контур керування створює передумови для переходу від суто параметричного регулювання до адаптивних стратегій управління, у яких керуючі дії узгоджуються з фактичним фізіологічним станом рослин. У такій архітектурі рішення щодо корекції температурних режимів, інтенсивності освітлення або подачі вуглекислого газу приймаються не лише на основі відхилень мікрокліматичних параметрів від уставок, але й з урахуванням візуально зафіксованих ознак розвитку продукції. Зокрема, переважання незрілих плодів у певних секціях теплиці може бути інтерпретоване як сигнал до оптимізації світлового режиму або концентрації CO₂, тоді як зростання частки дефектних плодів у поєднанні з підвищеною вологістю та температурою може слугувати підставою для інтенсифікації вентиляції або зміни режимів зволоження.

З метою забезпечення стабільності та достовірності керуючих рішень у структурі системи передбачається використання методів часово-просторової агрегації та перевірки консистентності результатів детекції. Окремі спрацювання з низьким рівнем упевненості не використовуються

безпосередньо для формування керуючих впливів; замість цього рішення базуються на узагальнених показниках, сформованих за певний часовий інтервал і просторову область. Такий підхід дозволяє зменшити вплив шумів, випадкових помилок розпізнавання та короточасних аномалій. У випадку відмови підсистеми комп'ютерного зору або втрати відеопотоку система керування автоматично переходить до консервативних режимів роботи, заснованих на класичних регуляторах мікроклімату, що забезпечує функціональну безперервність і безпечність експлуатації тепличного комплексу.

У межах даної магістерської роботи методи комп'ютерного зору розглядаються як концептуальне та технологічне розширення комп'ютерно-інтегрованої системи керування, спрямоване на формування додаткового рівня зворотного зв'язку, орієнтованого безпосередньо на стан рослин і продукції. Хоча ці методи не включені безпосередньо до математичної моделі та алгоритмів керування, реалізованих у наступних розділах, їх аналіз дозволяє обґрунтувати перспективи розвитку системи керування в напрямі підвищення адаптивності, зниження запізнення реакції на стресові фактори та підвищення загальної ефективності тепличного виробництва в умовах сучасного агропромислового середовища.

3 ТЕОРЕТИЧНІ ДОСЛІДЖЕННЯ МАТЕМАТИЧНИХ МОДЕЛЕЙ СИСТЕМИ ОПАЛЕННЯ ТЕПЛИЧНОГО СЕРЕДОВИЩА

Передавальна функція регулятора $W_p(s)$ визначає динамічну відповідь регулятора на вхідний сигнал.

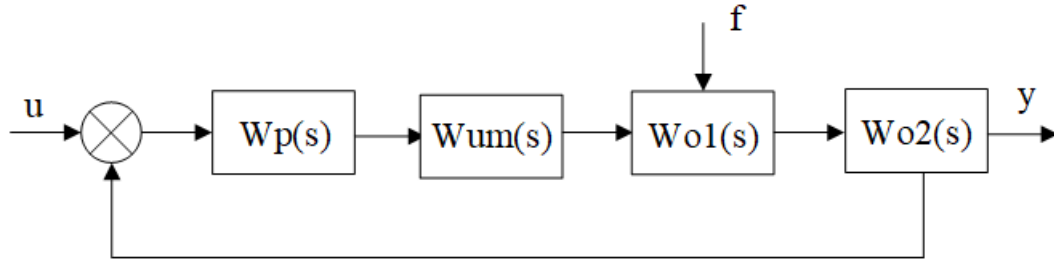


Рисунок 3.1 - Структурна схема

Структурна схема враховує часові затримки та інерційність системи, що виражається через коефіцієнти K_6 , τ_I , τ_I та τ_z . Ця функція відображає, як система реагує на помилку регулювання, тобто різницю між заданим та фактичним значенням температури повітря. Функція $W_{um}(s)$ представляє передавальну функцію виконавчого механізму, який може бути клапаном. Ця функція описує, як виконавчий механізм впливає на процес, змінюючи параметри теплоносія, що впливає на температуру повітря в теплообміннику. Передавальні функції об'єкта регулювання $Wo1(s)$, $Wo2(s)$ описують динаміку теплообмінника. Вони враховують фізичні процеси теплопередачі та теплові втрати в системі. Ці функції визначають, як теплообмінник реагує на зміни в умовах роботи, такі як зміна температури теплоносія або витрати повітря.

При проектуванні системи автоматичного керування для кожухотрубного теплообмінника важливо вибрати оптимальний тип регулятора для забезпечення стабільності та ефективності процесу теплообміну. Серед найпоширеніших типів регуляторів виділяються П (пропорційний), ПІ (пропорційно-інтегральний) та ПІД (пропорційно-інтегрально-диференціальний) регулятори.

Для системи було обрано П-регулятор з наступних причин. По-перше, П-регулятор забезпечує простоту налаштування та впровадження, що особливо важливо в умовах, коли процеси теплообміну мають відносно передбачувану динаміку. П-регулятор реагує на поточну похибку, забезпечуючи миттєву корекцію керуючого сигналу. Це дозволяє швидко стабілізувати систему та зменшити відхилення від встановлених значень параметрів.

По-друге, в умовах стабільної роботи кожухотрубного теплообмінника, де збурення мають переважно випадковий характер, пропорційного регулятора достатньо для підтримання необхідного рівня якості процесу. Інтегральна та диференціальна складові регулятора можуть бути зайвими, оскільки вони можуть призводити до підвищеної складності налаштування системи та можуть створювати коливання в системі, якщо параметри регулятора вибрані неправильно.

Крім того, з точки зору інженерного обслуговування, П-регулятори є найбільш надійними та економічно ефективними. Вони мають менше компонентів та простішу структуру, що знижує ймовірність відмов та полегшує обслуговування системи.

Таким чином, вибір П-регулятора для керування кожухотрубним теплообмінником обумовлений його простотою, ефективністю в умовах передбачуваних збурень та зниженням складності налаштування і обслуговування системи. Це забезпечує стабільну роботу теплообмінника та підтримує оптимальні умови теплообміну.

3.1 Вибір комплексу технічних засобів

На етапі використання тепла вторинної пари, температура реакції та температура конденсату вимірюються за допомогою термоелектричного методу з термопарами ТХК-0083 та ТПП. Термопара ТХК-0083 підходить

для діапазону від -50 до 600°C , а ТПП – для діапазону від 200 до 1600°C . У діапазоні $0\div 300^{\circ}\text{C}$, ТХК-0083 має лінійну статичну характеристику.

Для нормування вибрані перетворювачі МТМ 400 з градуванням ХК68. Вони мають діапазон вимірювання $0\div 150^{\circ}\text{C}$, вихідний струм $4 - 20$ мА та напругу живлення 24 В постійного струму. Для живлення використовується блок МТМ 141 з напругою ~ 220 В, 50 Гц та виходом 24 В постійного струму.

Вторинний прилад А-543-261, що показує та реєструє, має вхідний сигнал $4-20$ мА, шкалу $0-100\%$, напругу живлення ~ 220 В 50 Гц та три канали вимірювання.

Як регулятор обрано цифровий регулятор МІК-25 з вхідними аналоговими сигналами $0-5$ мА, $0(4)-20$ мА та вихідними аналоговими сигналами $0-5$ мА, $0-20$ мА, $4-20$ мА. Основна наведена похибка виміру становить $\pm 0,2\%$.

При вимірюванні витрат природного газу, кисню та конденсату на етапі використання тепла вторинної пари, застосовується метод змінного перепаду тиску. Для витрати конденсату використовується діафрагма камерна ДК25-80 з умовним проходом $D_y=80$ мм та умовним тиском 25 кгс/см².

Нормуючий перетворювач САПФІР-22-ДД-Ех модель 2460, у комплекті з БПС-24, має напругу живлення ~ 220 В 50 Гц та уніфікований вихідний сигнал $4-20$ мА. Сигнал подається на вторинний прилад А-543-261 з вхідним сигналом $4-20$ мА, шкалою $0-100\%$, напругою живлення ~ 220 В 50 Гц та трьома каналами вимірювання.

Цифровий регулятор МІК-25 використовується з вхідними аналоговими сигналами $0-5$ мА, $0(4)-20$ мА та вихідними аналоговими сигналами $0-5$ мА, $0-20$ мА, $4-20$ мА. Основна наведена похибка виміру $\pm 0,2\%$.

При зниженні рівня в скрубєрі нижче критичної межі, для зупинки насосів на лінії видачі конденсату використовується електричне контактне реле блокування: електромагнітна засувка.

Для вимірювання рівня використовується перетворювач САПФІР-22-ДГ-Ех модель 2540, у комплекті з БПС-24. Напруга живлення ~220 В, 50 Гц, вихідний сигнал – електричний уніфікований 4-20 мА. Сигнал подається на вторинний прилад А-543-261 з вхідним сигналом 4-20 мА, шкалою 0-100%, напругою живлення ~220 В 50 Гц та трьома каналами вимірювання.

Усі вибрані технічні засоби зведені у відомість приладів, що наведено у табл.4.1

Таблиця 4.1 - Відомість приладів

номер позиції	Вимірюваний параметр	Назва та тип приладу	Технічні характеристики	Примітки
1	2	3	4	5
1-1	Температура повітря на виході з кожухотрубного теплообмінника	Термопара хромель-бастард ТНК-0083	Гр.ХК68. Межі вимірювання 0–300°С.	Клас точності 0.5
1-2		Вторинний прилад КСП-2	Швидкодія 1с; струм живлення 0-5мА; мережа 220.	Клас точності 0.5
1-3		Цифровий регулятор МК-25	Вх. Сиг. 4-20 мА, вих. Сиг. 4-20 мА.	Базовий приклад неправильно. $\pm 0,2\%$.
1-4		Електричний виконавчий механізм ПР1-М		
1-5		Електромагнітна засувка		Нормально відкрита
2-1	Витрата гріючої пари	Звужуючий пристрій діафрагма камерна ДК25-100	Умовний прохід Ду = 100мм; умовний тиск 25кгс/см ² .	Межі виміру 0-100%
2-2		Передавальний перетворювач САПФІР-22-ДД-Ех модель 2460	Умовний тиск 40кгс/см ² ; вихідний струм 0-5мА	Клас точності 0.5
3-1	Тиск в міжтрубному просторі кожухотрубного теплообмінника	Вимірювальний перетворювач САПФІР-22ДІ-Ех модель 2530	Перепад тиску 0,1 МПа вихідний струм 0-5мА	Клас точності 0.5
3-2		Вторинний електричний прилад, що реєструє А543-261	Швидкодія 1с; струм живлення 0-5мА; мережа 220.	Клас точності 0.5
4-1	Температура повітря на вході до	Термопара хромель-бастард ТНК-0083	Гр.ХК68. Межі вимірювання 0–300°С.	Клас точності 0.5

4-2	кожухотрубного теплообмінника	Вторинний прилад КСП-2	Швидкодія 1с; струм живлення 0-5мА; мережа 220.	Клас точності 0.5
-----	-------------------------------	------------------------	---	----------------------

3.2 Аналіз та розрахунок теплових процесів

За рівнянням статики можна знайти витрати пари, необхідні для нагрівання суміші, з урахуванням значення r .

$$F_{to} = \frac{\alpha \cdot S_{ct} \cdot (T_{cto} - T_{po})}{r} = 51.258$$

Обчислимо сталі часу:

$$\tau_1 = \frac{m_{ct} \cdot C_{ct}}{\alpha \cdot S_{ct}} = 0.0886707$$

$$\tau_2 = \frac{m_p \cdot C_{ct}}{\alpha \cdot S_{ct}} = 0.6465846$$

Коефіцієнти передачі:

$$K_1 = \frac{r \cdot F_{to}}{\alpha \cdot S_{ct} \cdot T_{cto}}$$

$$K_2 = \frac{T_{po1}}{T_{cto}} = \frac{11}{80}$$

$$K_3 = \frac{(C_p \cdot T_{po} - C_{p1} \cdot T_{po1}) \cdot F_{po}}{(C_{p1} \cdot F_{po} + S_{ct} \cdot \alpha) \cdot T_{po1}} = -0.0005565201168$$

$$K_4 = \frac{C_p \cdot F_{po} \cdot T_{po}}{(C_{p1} \cdot F_{po} + S_{ct} \cdot \alpha) \cdot T_{po1}} = 0.001208758520$$

$$K_5 = \frac{\alpha \cdot S_{ct} \cdot T_{cto}}{(C_{p1} \cdot F_{po} + S_{ct} \cdot \alpha) \cdot T_{po1}} = 7.259888882$$

$$\tau_{II} = \frac{\tau_1 \cdot \tau_2}{-K_2 \cdot K_5 + 1} = 32.47822$$

$$\tau_I = \frac{\tau_1 + \tau_2}{-K_2 \cdot K_5 + 1} = 416.509488$$

$$K_6 = \frac{K_1 \cdot K_5}{-K_2 \cdot K_5 + 1} = 3547.119308$$

$$K_7 = \frac{K_3}{-K_2 \cdot K_5 + 1} = -0.3152590$$

$$K_8 = \frac{K_4}{-K_2 \cdot K_5 + 1} = 0.6847408$$

Підставивши значення параметрів у рівняння математичної моделі кожухотрубного теплообмінника матимемо:

$$\begin{aligned} 32.47 \cdot \frac{d^2 y}{dt^2} + 416.50 \cdot \frac{dy_2}{dt} + y_2 \\ = 3547.11 \cdot x_1 + (-0.32) \cdot \left(0.09 \cdot \frac{dx_2}{dt} + x_2 \right) + 0.68 \cdot \left(0.09 \cdot \frac{dz}{dt} + z \right) \end{aligned}$$

З отриманої математичної моделі можна зробити висновок, що зв'язки між вихідним параметром y_2 і вхідним параметром x_2 та збуренням z є незначними і при практичних розрахунках можуть бути проігноровані. Тоді математична модель буде мати наступний вигляд:

$$32.47 \cdot \frac{d^2 y}{dt^2} + 416.50 \cdot \frac{dy_2}{dt} + y_2 = 3547.11$$

Передавальна функція об'єкта керування за каналом регулювання може бути виражена наступним чином:

$$W_p(s) = \frac{32.47}{3547.11 s^2 + 416.50 s + 1}$$

Підводячи підсумок, можна зазначити, що кожухотрубний теплообмінник як об'єкт керування описується диференціальним рівнянням другого порядку. Це означає, що за певних умов перехідна функція об'єкта може мати коливальний характер. Зокрема, якщо $\frac{\tau}{\sqrt{\tau''}} < 2$, можливий коливальний режим роботи об'єкта.

У даному випадку, при відношенні $73 > 2$, можна зробити висновок, що перехідний процес кожухотрубного теплообмінника описується рівнянням аперіодичної ланки другого порядку.

Для визначення часу запізнення теплообмінника за каналом зміни теплоносія необхідно врахувати час запізнення припливу теплоносія і час запізнення проходження його через теплообмінник.

Час запізнення припливу теплоносія залежить від швидкості руху теплоносія та геометрії теплообмінника. Час запізнення проходження теплоносія через теплообмінник визначається часом, необхідним для теплоносія пройти всю довжину теплообмінника.

$$\tau_p = \tau_T + \tau_{CT}$$

Площа теплоносія може бути розрахована за формулою:

$$St = \frac{3.14}{4} D_{vk}^2 - N \frac{3.14}{4} d_t^2$$

де - внутрішній діаметр кожуху, $D_{vk} = 315 - 2 \cdot 5 = 305$ мм

враховуючи, що 325 мм – зовнішній діаметр кожуху з довідникових джерел.

Після виконання розрахунків зазначеними формулами, буде отримана площа теплоносія.

$$St = 0.050416$$

Об'єм:

$$V_t = St \cdot l = 0.08772384$$

$$\tau_t = \frac{V_t \cdot \rho}{F_{to}}$$

$$\tau_t = 0.002096475$$

Кількість теплоти, яка необхідна для нагрівання речовини:

$$q = m_p \cdot C_p \cdot (T_{cto} - T_{po})$$

$$q = 68336.55361$$

$$\tau_{ct} = \frac{q}{\alpha \cdot S_{ct} \cdot (T_{cto} - T_{po1})}$$

$$\tau_{ct} = 0.6363632383$$

$$\tau_f = \tau_t + \tau_{ct}$$

$$\tau_f = 0.6384597137$$

Враховуючи час запізнення, передаточна функція кожухотрубного теплообмінника за каналом регулювання може бути виражена наступним чином:

$$W_p(s) = W_p(s) = \frac{32.47}{3547.11 s^2 \cdot 416.50 \cdot s + 1} \cdot e^{2.19 \cdot s}$$

Одержання перехідних характеристик об'єкта керування

Побудуємо перехідний процес за каналом регулювання:

$$W_p = \frac{K_6 \cdot e^{-\tau_f \cdot s}}{\tau_{II} \cdot s^2 + \tau_I \cdot s + 1}$$

$$W_p = \frac{3.547119308e^{-0.6385937137w}}{-32.47824818w^2 + 416.5094882w + 1}$$

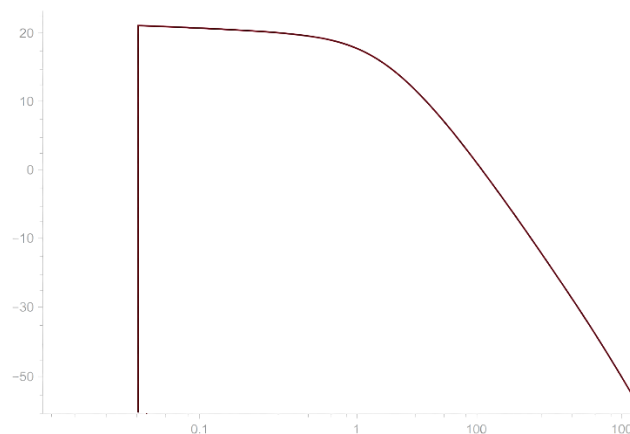


Рисунок 3.2 - Амплітудно-частотна характеристика

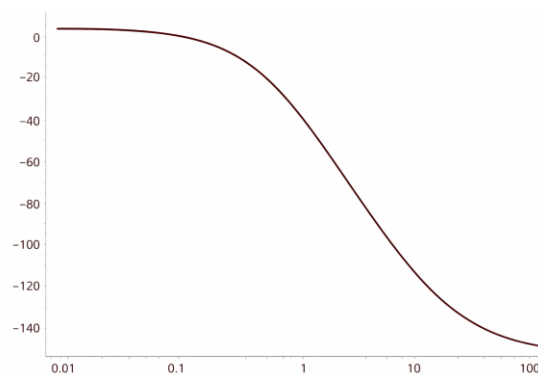


Рисунок 3.3 - Фазова частотна характеристика

Таким чином, $\omega_{kp1} = 0.042$, $A(\omega_{kp1}) = 0.087$.

Тоді для П-регулятора $K_{p1} = \frac{0.5}{A(\omega_{kp1})} = 8.52$.

Передатна функція регулятора $W_{p1}(s) = K_{p1} = 8.52$.

Побудуємо перехідний процес.

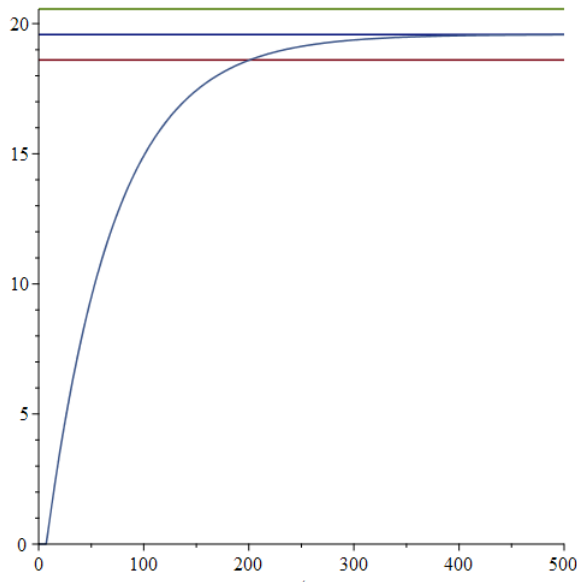


Рисунок 3.4 - Перехідний процес

Знайдемо показники якості перехідного процесу:

- час регулювання $t_p = 562c$;
- перерегулювання $\sigma = \frac{y_{max1} - y_{уст}}{y_{уст}} \cdot 100\% = \frac{1.43 - 1.17}{1.17} \cdot 100\% = 20\%$.

Побудуємо частотні характеристики для всієї системи:

3.3 Аналіз результатів теоретичних досліджень

На основі побудованої математичної моделі системи керування температурним режимом теплиці виконано аналіз її динамічних та частотних властивостей із використанням математичного застосунка. Для оцінювання поведінки системи в частотній області були визначені амплітудно-частотна та фазово-частотна характеристики, наведені відповідно на рисунках 3.2 та 3.3. Отримані характеристики дозволяють оцінити стійкість системи, її чутливість до гармонічних збурень, а також обґрунтувати вибір параметрів регулятора.

Амплітудно-частотна характеристика демонструє наявність чітко вираженої низькочастотної області з практично сталим коефіцієнтом підсилення, що відповідає інерційному характеру теплотехнічного об'єкта. У цьому діапазоні система адекватно відтворює повільні зміни вхідного впливу, що є принципово важливим для задач підтримання температури в теплиці. Зі зростанням частоти спостерігається спад амплітуди, який свідчить про здатність системи пригнічувати швидкі збурення та шумові складові, характерні для випадкових теплових флуктуацій. Така форма АЧХ є типовою для об'єктів з великими тепловими ємностями та підтверджує коректність прийнятого математичного опису.

Фазово-частотна характеристика, наведена на рисунку 3.3, відображає монотонне зменшення фази зі зростанням частоти, що зумовлено наявністю інерційних ланок у передатній функції об'єкта керування. У низькочастотній області фазовий зсув є незначним, що забезпечує синфазну реакцію системи на повільні зміни уставки. В області середніх частот спостерігається поступовий перехід до значних фазових зсувів, які обмежують можливість підвищення коефіцієнта підсилення без втрати запасу стійкості. Отримана ФЧХ дозволяє зробити висновок про достатній фазовий запас системи за обраних параметрів регулятора, що є необхідною умовою стійкої роботи автоматизованого контуру.

Для оцінювання часових показників якості було побудовано перехідний процес системи при одиничній зміні вхідного впливу, наведений на рисунку 3.4. Аналіз кривої перехідного процесу показує аперіодичний характер реакції системи з помірно вираженим перерегулюванням. Час регулювання становить приблизно $t_p=562\text{с}$, що відповідає тепловій інерційності об'єкта та є прийнятним для технологічних процесів тепличного господарства, де швидкі зміни температури є небажаними з біологічної точки зору. Величина перерегулювання не перевищує $\sigma=20\%$, що свідчить про компроміс між швидкодією та стабільністю процесу регулювання.

Використання передатної функції регулятора з коефіцієнтом підсилення

$Wp1(s)=8.52$ забезпечує необхідний рівень впливу на об'єкт керування для досягнення заданих показників якості. Обране значення підсилення узгоджується з частотними характеристиками системи та не призводить до зменшення запасу стійкості. Отримані результати свідчать про те, що синтезований регулятор забезпечує адекватну реакцію системи на зміну уставки та зовнішні збурення, зберігаючи стійкість і прогнозованість динаміки.

Таким чином, аналіз амплітудно-частотної, фазово-частотної характеристик і перехідного процесу, виконаний у математичному застосунку, підтверджує коректність побудованої математичної моделі та обґрунтованість вибору параметрів регулятора. Отримані частотні та часові характеристики можуть бути використані як еталонні при подальшій програмній реалізації системи керування та порівняльному аналізі з результатами моделювання в інших середовищах.

3.4 Розробка функціональної схеми АСК ТП системи опалення тепличного середовища

Автоматизація технологічних процесів є ключовим елементом підвищення ефективності, надійності та безпеки сучасного виробництва. Розробка функціональної схеми автоматизації забезпечує систематичний підхід до управління, контролю та регулювання технологічних параметрів, що дозволяє мінімізувати вплив людського фактору та знижує ризики виникнення аварійних ситуацій.

У цьому проекті розглядається розробка функціональної схеми автоматизації для системи теплообміну, що використовує енергію вторинної пари для підігріву повітря. Система включає в себе кілька ключових компонентів, таких як кожухотрубний теплообмінник, датчики температури,

перетворювачі сигналів, мікропроцесорний контролер, та виконуючі механізми.

Основною метою цієї роботи є створення ефективної та надійної системи автоматизації, яка забезпечить стабільний та безпечний режим роботи теплообмінника, оптимізує використання енергії та забезпечить точний контроль температури на виході з теплообмінника. У процесі розробки буде враховано всі необхідні технічні вимоги та нормативні документи для досягнення високої якості та надійності системи.

На вхід до кожухотрубного теплообмінника подається вторинна пара з виробництва аміачної селітри при температурі 100°C . Ця пара проходить по трубах всередині теплообмінника. Одночасно знизу теплообмінника подається повітря, яке проходить через міжтрубний простір, нагріваючи тепличне середовища з $16\text{--}22^{\circ}\text{C}$. До виходу з верхньої частини теплообмінника. З нижньої частини теплообмінника виділяється паровий конденсат.

Для регулювання температури на виході з теплообмінника встановлено термометр опору ТНК-0083. Оскільки цей прилад не має стандартного уніфікованого сигналу, його підключено до перетворювача КСП-2, який перетворює зміни опору на уніфікований струмовий сигнал 4-20 мА.

Уніфікований сигнал надходить до мікропроцесорного контролера МІК-25, який обробляє сигнал, контролює, сигналізує та блокує. Контролер також забезпечує можливість спостерігати за змінами параметра. Одночасно сигнал проходить через гальванічну розв'язку вхідних ланцюгів РГ12, де очищується від магнітних наводок та електромагнітних полів.

Після РГ12 сигнал потрапляє до аналого-цифрового перетворювача (АЦП), де він перетворюється з аналогового на цифровий. Цей цифровий сигнал обробляється процесором, який порівнює його з заданим параметром, розраховуючи різницю між поточним значенням та заданим.

З процесора сигнал надходить на пульт оператора, де оператор може спостерігати за всіма змінами параметра. Одночасно сигнал подається на цифро-аналоговий перетворювач (ЦАП), де він знову перетворюється на аналоговий сигнал 4-20 мА для сприйняття схемами сигналізації. Після ЦАП сигнал проходить через розв'язку вихідних ланцюгів (РГ21) і надходить на дистанційне управління (ДУ), яке використовується для пуску-зупинки технологічного процесу та в аварійних ситуаціях.

З ДУ сигнал надходить на електропневмоперетворювач ПР1-М, де він перетворюється на уніфікований пневматичний сигнал 0.02-0.1 МПа. Цей пневматичний сигнал потрапляє до мембранного виконуючого механізму з регулюючим органом, який безпосередньо регулює параметр, забезпечуючи необхідну температуру на виході з теплообмінника.

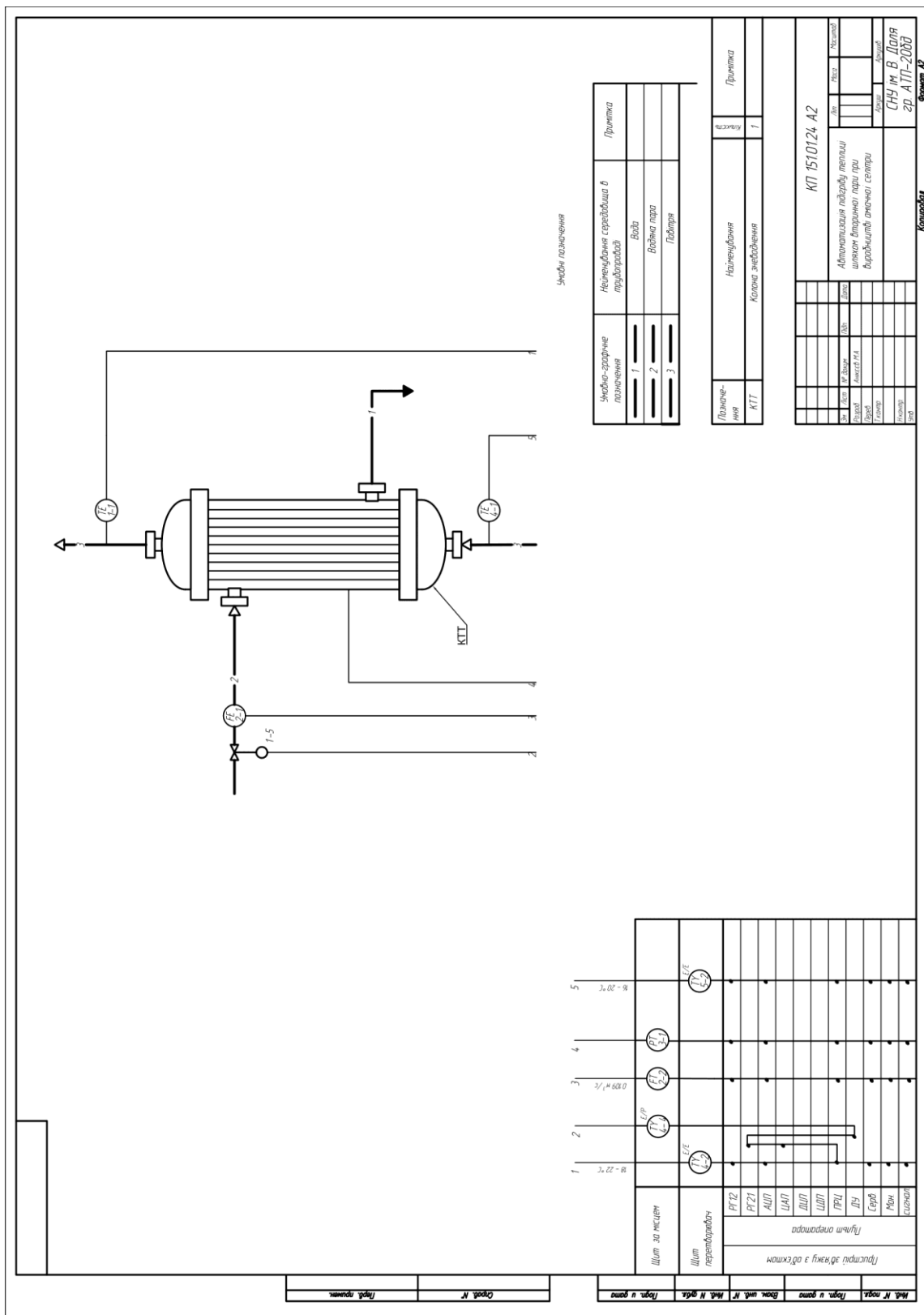


Рисунок 3.7 – функціональна схема автоматизації кожохотрубного теплообмінника

4 ПРОГРАМНА ТА КОМП'ЮТЕРНО-ІНТЕГРОВАНА РЕАЛІЗАЦІЯ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ ТЕПЛИЧНИМ МІКРОКЛІМАТОМ

У попередніх розділах роботи було сформовано уявлення про тепличний комплекс як об'єкт керування, визначено основні теплові процеси та побудовано математичну модель, що описує динаміку зміни параметрів мікроклімату за дії керуючих і збурювальних впливів. Отримані співвідношення та результати моделювання створюють теоретичну основу для формування алгоритмів керування та вибору параметрів регуляторів, однак їх практичне застосування можливе лише за умови коректної програмної та апаратної реалізації системи керування.

Реалізація системи керування є невід'ємним етапом переходу від абстрактної математичної моделі до функціональної інженерної системи, здатної працювати в умовах реального тепличного господарства. У цьому контексті особливого значення набуває узгодження структури програмного забезпечення з фізичною природою процесу, архітектурою вимірювальних і виконавчих пристроїв, а також з логікою побудови замкнених контурів регулювання. Програмна реалізація має забезпечувати не лише підтримання заданих параметрів, а й прозорість керування, можливість аналізу поточного стану та корекції режимів відповідно до зміни зовнішніх умов.

Сучасні тепличні комплекси функціонують у середовищі, де параметри мікроклімату тісно взаємопов'язані та змінюються під впливом багатьох факторів, зокрема погодних умов, інсоляції, теплових втрат, вентиляції та технологічних особливостей виробництва. У таких умовах ефективне керування неможливе без використання комп'ютерно-інтегрованих систем, які забезпечують безперервний збір інформації, обробку даних і формування керуючих впливів у реальному часі. Саме ці системи створюють середовище, у якому результати математичного опису процесу можуть бути інтерпретовані та реалізовані у вигляді конкретних алгоритмів керування.

У межах даної роботи програмна та комп'ютерно-інтегрована реалізація системи керування розглядається як логічне продовження побудованої моделі та синтезованих регуляторів. Особлива увага приділяється відповідності між структурою моделі й архітектурою програмного рішення, що дозволяє зберегти фізичний зміст процесів при переході до рівня керування. Такий підхід забезпечує цілісність системи та зменшує ризик розбіжностей між розрахунковими характеристиками й поведінкою реального об'єкта.

Практична реалізація системи керування здійснюється із використанням SCADA-платформ, які широко застосовуються в промислових і аграрних автоматизованих системах. Застосування SCADA-середовища дозволяє реалізувати операторський інтерфейс, забезпечити візуалізацію технологічних процесів, організувати архівацію параметрів та контроль аварійних режимів. У роботі розглядається приклад реалізації теплового контуру теплиці в середовищі TraceMode, що дає змогу проілюструвати інтеграцію математичної моделі, регулятора та виконавчих механізмів у єдиній програмній структурі.

Разом із тим універсальні SCADA-платформи орієнтовані насамперед на задачі експлуатаційного керування і не завжди є зручними для глибокого аналізу поведінки системи або варіювання параметрів моделі. З цієї причини в роботі додатково розглядається спеціалізоване програмне рішення, розроблене з урахуванням особливостей конкретного тепличного процесу. Таке рішення дозволяє спростити структуру керування, підвищити прозорість алгоритмів і створити основу для подальшого розширення системи відповідно до зміни технологічних вимог.

Таким чином, у цьому розділі узагальнюється підхід до програмної та комп'ютерно-інтегрованої реалізації системи керування тепличним мікрокліматом, починаючи від архітектури системи та використання SCADA-середовищ і завершуючи спеціалізованим програмним

інструментом. Розглянуті рішення дозволяють пов'язати математичний опис процесу з практичними аспектами керування та створюють основу для впровадження енергоефективних і керованих тепличних комплексів.

4.1 Архітектура комп'ютерно-інтегрованої системи керування тепличним мікрокліматом

У межах даної роботи програмна та апаратна реалізація системи керування тепличним мікрокліматом розглядається як безпосереднє продовження побудованої математичної моделі та сформованих алгоритмів регулювання. Архітектура комп'ютерно-інтегрованої системи керування визначається фізичною природою теплотехнічного процесу, структурою теплового контуру та вимогами до стабільності параметрів внутрішнього середовища теплиці.

Система керування будується за ієрархічним принципом і включає три функціональні рівні: рівень об'єкта керування, рівень локального регулювання та рівень програмного нагляду й візуалізації. Такий підхід дозволяє розділити функції вимірювання, формування керуючих впливів і операторського контролю, зберігаючи при цьому цілісність системи та прозорість керування.

На рівні об'єкта керування знаходиться тепличний комплекс із теплотехнічним контуром, що включає джерело вторинного тепла, теплообмінник, циркуляційний контур теплоносія та теплицю як споживача теплової енергії. Саме цей рівень описується математичною моделлю, наведеною в розділі 3, де зміна температури в теплиці розглядається як результат взаємодії теплових потоків, теплових втрат та інерційних властивостей системи.

Рівень локального регулювання реалізує алгоритми керування, сформовані на основі математичного опису процесу. Центральним елементом цього рівня є регулятор, параметри якого визначаються з урахуванням динамічних властивостей теплового контуру. У межах роботи

використовується П-регулятор, який забезпечує компенсацію сталих збурень та усунення статичної похибки регулювання температури. Регулятор формує керуючий вплив на виконавчі механізми системи опалення, зокрема на регулюючі клапани або насосне обладнання циркуляційного контуру.

Вхідними сигналами для регулятора є виміряні значення температури в теплиці $T(t)$, а також задане значення температурного режиму $T_{\text{зад}}$, що надходить із програмного рівня. Вихідний сигнал регулятора інтерпретується як керуюча дія $u(t)$, яка впливає на інтенсивність теплопередачі або витрату теплоносія. Таким чином формується замкнений контур автоматичного регулювання, у межах якого система безперервно реагує на зміну зовнішніх і внутрішніх умов функціонування.

Для узагальненого подання взаємозв'язків між основними функціональними елементами системи керування у роботі використовується функціональна структурна схема, яка відображає логіку побудови замкненого контуру регулювання, а також розподіл функцій між фізичним об'єктом, алгоритмом керування та програмним рівнем.

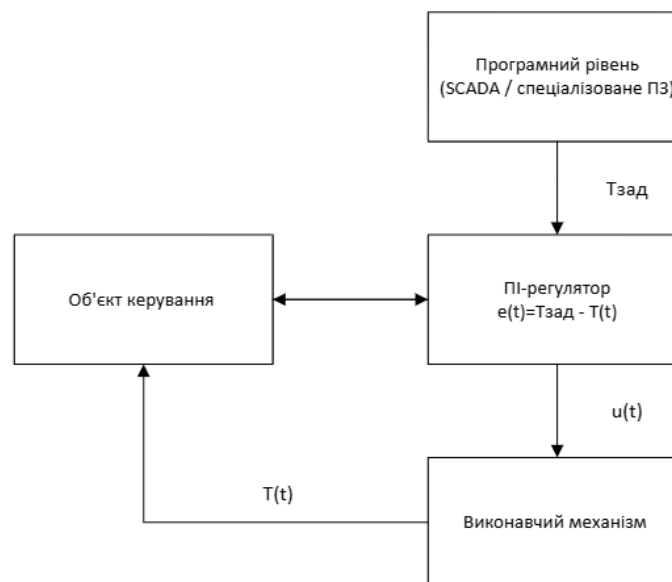


Рисунок 4.2 - Функціональна структурна схема комп'ютерно-інтегрованої системи керування тепличним мікрокліматом.

Програмний рівень системи керування забезпечує інтеграцію локальних контурів регулювання, візуалізацію процесів та взаємодію з оператором. На цьому рівні здійснюється задання уставок температурного режиму, збір даних із вимірювальних каналів, відображення поточного стану системи, реєстрація параметрів і контроль аварійних ситуацій. Програмна надбудова не втручається безпосередньо в динаміку замкненого контуру регулювання, а виконує функції нагляду, аналізу та корекції режимів роботи.

Загальна структура комп'ютерно-інтегрованої системи керування дозволяє забезпечити узгодженість між математичною моделлю процесу та її практичною реалізацією. Розподіл функцій між рівнями спрощує подальше розширення системи, зокрема інтеграцію додаткових контурів керування або підключення альтернативних програмних рішень. Така архітектура створює основу для реалізації системи керування як у промисловому SCADA-середовищі, так і у вигляді спеціалізованого програмного інструменту, що буде розглянуто в наступних підрозділах.

4.2 Програмна реалізація системи керування в SCADA-середовищі

Програмна реалізація системи керування мікрокліматом тепличного комплексу є ключовим етапом переходу від математичного опису теплотехнічного процесу до його практичного відтворення в умовах комп'ютерно-інтегрованого керування. На цьому етапі сформована в попередніх розділах модель об'єкта керування та алгоритми регулювання реалізуються у вигляді програмних модулів, здатних працювати в реальному або модельному часі, забезпечуючи замкнений контур автоматичного регулювання.

Для реалізації системи керування використано SCADA-середовище TraceMode, яке дозволяє поєднувати функції візуалізації технологічного

процесу, програмної обробки сигналів, реалізації алгоритмів регулювання та збору даних у єдиній інтегрованій системі. Вибір даного середовища зумовлений можливістю реалізації як стандартних алгоритмів автоматичного керування, так і спеціалізованих обчислювальних процедур, необхідних для моделювання теплотехнічних процесів із рекуперацією тепла.

У межах даної роботи TraceMode використовується не лише як засіб операторського нагляду, а передусім як платформа для програмної реалізації теплотехнічної моделі тепличного комплексу та алгоритмів регулювання температурного режиму. Це дозволяє безпосередньо пов'язати змінні математичної моделі з програмними змінними системи керування, забезпечуючи адекватне відтворення динамічної поведінки об'єкта в умовах змінних зовнішніх і внутрішніх впливів.

Програмна структура системи керування в SCADA-середовищі організована відповідно до ієрархічного принципу. На нижньому рівні здійснюється обробка вимірювальних сигналів і розрахунок температурних параметрів, що відповідають стану тепличного мікроклімату та теплотехнічного контуру. На рівні локального керування реалізуються алгоритми регулювання, які формують керуючі впливи на виконавчі механізми системи опалення залежно від відхилення поточних параметрів від заданих значень. На вищому рівні здійснюється візуалізація процесу, моніторинг параметрів та збереження результатів для подальшого аналізу.

Особливістю програмної реалізації є дискретний характер обчислень, зумовлений циклічною роботою SCADA-системи. У зв'язку з цим теплотехнічна модель, описана диференційними рівняннями, була приведена до дискретної форми з урахуванням заданого часового кроку. Для забезпечення коректного відтворення інерційних властивостей системи в програмній реалізації передбачено збереження внутрішніх станів між циклами обчислення, що дозволяє моделювати перехідні процеси та накопичення теплової енергії в елементах контуру.

Програмна реалізація також передбачає можливість варіювання параметрів моделі та регулятора без зміни структури алгоритмів. Це створює умови для дослідження різних режимів роботи системи, аналізу впливу рекуперації тепла на температурний режим теплиці та оцінки чутливості системи керування до зміни зовнішніх умов. Таким чином, SCADA-середовище використовується як інструмент комп'ютерного експерименту, що доповнює аналітичний опис процесу.

У наступних підрозділах розділу детально розглянуто візуальну модель теплотехнічного контуру, програмну реалізацію теплотехнічної моделі та алгоритмів керування, а також засоби візуалізації динаміки процесу в SCADA-середовищі TraceMode.

4.2.1 Операторська візуальна модель теплотехнічного контуру

Візуальна модель теплотехнічного контуру є важливим елементом програмної реалізації системи керування мікрокліматом тепличного комплексу, оскільки вона забезпечує наочне відображення фізичної структури процесу, взаємозв'язків між його складовими та напрямків передачі теплової енергії. У SCADA-середовищі TraceMode візуальна модель виконує не лише інформаційну функцію, а й слугує інтерфейсом взаємодії між оператором, програмною реалізацією моделі та алгоритмами керування.

У межах даної роботи візуальна модель відтворює теплотехнічний контур тепличного комплексу з використанням рекуперації тепла від зовнішнього технологічного джерела. Основними елементами контуру є джерело вторинного тепла, теплообмінний апарат, циркуляційний контур теплоносія та теплиця як кінцевий споживач теплової енергії.

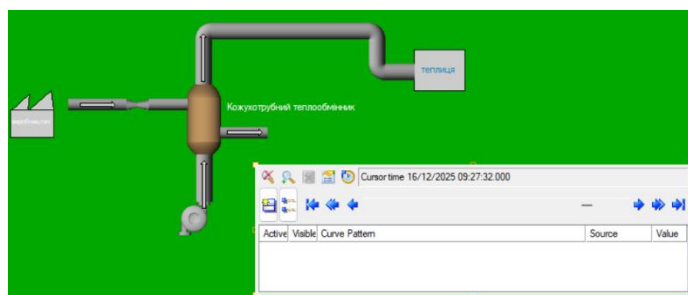


Рисунок 4.2 - Візуальна модель теплотехнічного контуру системи опалення теплиці в SCADA-середовищі TraceMode.

Така структура дозволяє наочно представити процес передачі тепла від промислового або технологічного об'єкта до системи опалення теплиці, а також простежити вплив керуючих дій на температурний режим внутрішнього середовища.

На рисунку 4.2 представлено візуальну модель теплотехнічного контуру, реалізовану в SCADA-середовищі TraceMode. Схема відображає основні технологічні елементи системи та напрямки руху теплоносія. Гарячий технологічний потік надходить від джерела вторинного тепла до кожухотрубного теплообмінника, у якому здійснюється передача теплової енергії до водяного циркуляційного контуру. Після теплообміну нагрітий теплоносій спрямовується до системи опалення теплиці, забезпечуючи підтримання заданого температурного режиму внутрішнього повітря.

Циркуляційний насос, представлений на схемі, забезпечує замкнений рух теплоносія в контурі та стабільну подачу теплової енергії до теплиці. Наявність замкненого контуру дозволяє враховувати інерційні властивості системи, акумуляцію тепла та запізнення в реакції температури теплиці на зміну керуючих впливів. Саме ці властивості є визначальними для подальшого математичного моделювання та синтезу алгоритмів керування.

Візуальна модель у TraceMode інтегрована з програмною реалізацією теплотехнічної моделі та алгоритмів регулювання. Кожному елементу схеми відповідають програмні змінні, що відображають поточні значення температур, витрат теплоносія та інших параметрів процесу. Це дозволяє в реальному або модельному часі спостерігати зміну стану системи та аналізувати реакцію тепличного мікроклімату на зміну зовнішніх умов або уставок керування.

Окрім відображення фізичної структури процесу, візуальна модель виконує функцію засобу моніторингу. У ключових точках теплотехнічного контуру реалізовано контроль параметрів, що дозволяє відстежувати температуру теплоносія на вході та виході з теплообмінника, температуру в

теплиці та інші технологічні величини. Такий підхід спрощує аналіз роботи системи, підвищує прозорість процесу керування та знижує ризик некоректної інтерпретації результатів моделювання.

Важливою особливістю побудованої візуальної моделі є її відповідність реальній фізичній структурі теплотехнічного процесу. Це дозволяє використовувати модель не лише для демонстрації роботи системи керування, а й як основу для подальшого комп'ютерного моделювання, аналізу перехідних процесів та дослідження ефективності рекуперації тепла. Завдяки цьому візуальна модель виступає сполучною ланкою між теоретичним описом системи, наведеним у попередніх розділах, та результатами моделювання, які будуть розглянуті надалі.

Програмна реалізація теплотехнічної моделі та алгоритмів керування в SCADA-середовищі TraceMode здійснюється з урахуванням фізичної природи процесів теплопередачі та динамічних властивостей тепличного комплексу. Метою програмної реалізації є відтворення поведінки теплотехнічного контуру в дискретному часі з можливістю формування керуючих впливів відповідно до відхилення параметрів мікроклімату від заданих значень.

У межах роботи програмна реалізація побудована на основі математичної моделі, наведеної в розділі 3, шляхом приведення її до дискретної форми. Це зумовлено циклічним характером виконання програмних модулів у SCADA-системі, де обчислення виконуються з фіксованим часовим кроком. Такий підхід дозволяє адекватно моделювати перехідні процеси та враховувати інерційність теплового контуру.

Програмний модуль реалізує обчислення температурних параметрів на основі вхідних сигналів, що відповідають зовнішнім умовам та керуючим впливам. До вхідних змінних належать температура зовнішнього середовища, параметри джерела вторинного тепла та витрата теплоносія в циркуляційному контурі. Вихідними змінними є температура теплоносія та

температура повітря в теплиці, які визначають стан мікроклімату та використовуються для формування зворотного зв'язку.

PROGRAM

```

VAR_INPUT T_out : REAL := 10; END_VAR
VAR_INPUT T_steam : REAL; END_VAR
VAR_INPUT Flow : REAL := 0.6; END_VAR
VAR_OUTPUT T_greenhouse : REAL; END_VAR
VAR_OUTPUT T_water : REAL; END_VAR
VAR_INPUT dt_sec : REAL; END_VAR

```

VAR

```

K      : REAL := 0.8;
T1     : REAL := 120.0;
T2     : REAL := 60.0;
L      : REAL := 10.0;
Kz     : REAL := 0.02;
TambRef : REAL := 0.0;

KUW    : REAL := 0.5;
TW     : REAL := 90.0;

x1     : REAL := 20.0;
x2     : REAL := 0.0;

w      : REAL := 0.0;
u_prev : REAL := 0.0;

sumInvT : REAL;
invT1T2 : REAL;

```

```

du    : REAL;
ydd   : REAL;
yOut  : REAL;
TwNext : REAL;

```

```

inited : BOOL := FALSE;

```

```

END_VAR

```

```

IF NOT inited THEN

```

```

    IF dt_sec <= 0.0 THEN dt_sec := 1.0; END_IF;

```

```

    u_prev := Flow;

```

```

    w := Flow;

```

```

    inited := TRUE;

```

```

END_IF;

```

```

IF T1 <= 0.0 THEN T1 := 1.0; END_IF;

```

```

IF T2 <= 0.0 THEN T2 := 1.0; END_IF;

```

```

IF L <= 0.0 THEN L := 1e-6; END_IF;

```

```

sumInvT := (1.0 / T1) + (1.0 / T2);

```

```

invT1T2 := 1.0 / (T1 * T2);

```

```

du := Flow - u_prev;

```

```

w := w + du + dt_sec * (2.0 / L) * (Flow - w);

```

```

u_prev := Flow;

```

```

ydd := -sumInvT * x2 - invT1T2 * x1 + K * w + Kz * (T_out - TambRef);

```

```

x2 := x2 + dt_sec * ydd;

```

```

x1 := x1 + dt_sec * x2;

```

```
yOut := x1;
```

```
TwNext := T_water + dt_sec * ((KUW * yOut - T_water) / TW);
```

```
T_water := TwNext;
```

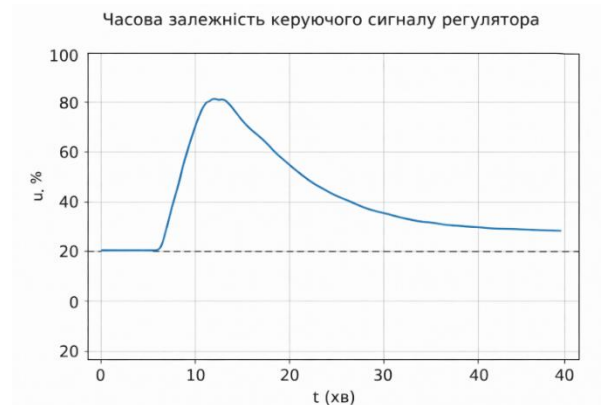
```
T_greenhouse := yOut;
```

```
END_PROGRAM
```

4.2.2 Візуалізація процесу та часові залежності параметрів

Візуалізація динаміки теплотехнічного процесу є необхідним елементом програмної реалізації системи керування, оскільки вона дозволяє наочно простежити реакцію об'єкта на керуючі впливи, зміну зовнішніх умов та параметрів рекуперації тепла. У SCADA-середовищі TraceMode для цього використовуються часові тренди, що відображають зміну основних параметрів системи в дискретному часі.

У межах даної роботи візуалізація використовується не як допоміжний інтерфейс оператора, а як інструмент аналізу поведінки системи керування.



Побудовані часові залежності дозволяють оцінити характер перехідних процесів, швидкість виходу системи на усталений режим, наявність коливань та вплив алгоритмів керування на стабільність температурного режиму теплиці. Основним параметром, що аналізується, є температура повітря в теплиці, яка безпосередньо визначає стан мікроклімату. Крім того, для комплексного аналізу розглядаються температури теплоносія в циркуляційному контурі, а також величина керуючого сигналу, що формується регулятором. Сукупний розгляд цих параметрів дозволяє простежити причинно-наслідкові зв'язки між керуючими впливами та реакцією об'єкта керування.

Аналіз графіка, наведеного на рисунку 4.4, показує, що температура теплоносія змінюється з певним запізненням відносно керуючого сигналу, що зумовлено тепловою інерцією теплообмінника та акумулюючими властивостями системи. Це підтверджує необхідність використання алгоритмів регулювання, здатних компенсувати запізнення та забезпечувати стабільність температурного режиму в теплиці.

Рисунок 4.3 - Часова залежність температури повітря в теплиці при зміні уставки.

Окрему увагу приділено аналізу керуючого сигналу, сформованого регулятором. Його поведінка дозволяє оцінити інтенсивність втручання системи керування та рівень навантаження на виконавчі механізми.

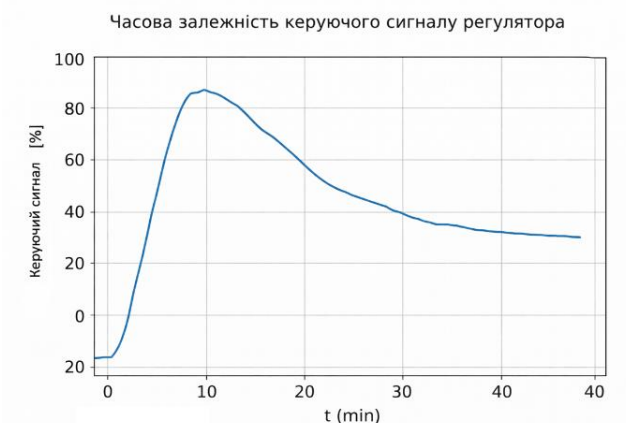


Рисунок 4.4 - Часова залежність керуючого сигналу регулятора.

З аналізу графіка видно, що керуючий сигнал змінюється без різких коливань і не досягає граничних значень, що свідчить про стійку роботу системи та відсутність перенасичення регулятора. Така поведінка є важливою з погляду практичної реалізації, оскільки зменшує знос обладнання та підвищує надійність роботи системи в тривалому режимі.

Отримані часові залежності підтверджують, що програмна реалізація теплотехнічної моделі та алгоритмів керування в SCADA-середовищі TraceMode дозволяє адекватно відтворювати динаміку процесу керування мікрокліматом тепличного комплексу. Візуалізація параметрів у часі створює основу для подальшого аналізу режимів роботи системи, порівняння різних сценаріїв керування та оцінки впливу рекуперації тепла, що буде розглянуто в наступних розділах роботи.

4.3 Спеціалізований програмний інструмент для моделювання процесу керування мікрокліматом теплиці

У межах даної роботи, поряд із використанням універсального SCADA-середовища, було реалізовано спеціалізований програмний інструмент, призначений для моделювання процесу керування мікрокліматом

тепличного комплексу з урахуванням рекуперації тепла. Створення такого інструменту зумовлене необхідністю зосередженого аналізу динамічної поведінки теплотехнічного процесу та алгоритмів регулювання без використання повнофункціональної SCADA-архітектури.

Універсальні SCADA-системи орієнтовані на широкий клас промислових об'єктів і поєднують у собі засоби керування, візуалізації, архівації та взаємодії з апаратними компонентами. Водночас у рамках даної роботи виникає потреба у програмному середовищі, яке дозволяє швидко змінювати параметри математичної моделі, аналізувати вплив окремих коефіцієнтів та відтворювати часову динаміку процесу керування з мінімальною надбудою.

Розроблений програмний інструмент побудовано як логічне продовження математичної моделі, сформованої в розділі 3. Його основне призначення полягає у чисельному відтворенні динаміки температурного режиму теплиці у дискретному часі та реалізації алгоритму автоматичного регулювання, структура якого відповідає алгоритмам, використаним у SCADA-середовищі. Такий підхід забезпечує узгодженість між аналітичним описом процесу та його програмною реалізацією.

Архітектура програмного інструменту відповідає концепції замкнутого контуру автоматичного керування і включає модель теплотехнічного процесу, блок формування похибки регулювання та алгоритм обчислення керуючого сигналу. Обчислення виконуються з фіксованим часовим кроком, що дозволяє коректно відтворювати перехідні процеси та враховувати інерційні властивості теплового контуру теплиці.

Важливою складовою програмного інструменту є модуль візуалізації, який забезпечує відображення основних параметрів процесу у часовій області. До таких параметрів належать температура повітря в теплиці, керуючий сигнал регулятора та інші змінні, що характеризують стан системи. Візуалізація дозволяє наочно простежити реакцію системи керування на

зміну уставок і зовнішніх умов, а також оцінити характер перехідних процесів.

Окрему увагу приділено реалізації елементів функціонального контролю та сигналізації. Контроль граничних значень температури та керуючих впливів дозволяє відтворити логіку захисних і попереджувальних режимів, характерних для практичних систем керування тепличними комплексами. Це підвищує прикладну цінність розробленого програмного інструменту та наближує його до умов реальної експлуатації.

Перевагою спеціалізованого програмного інструменту є його гнучкість та можливість подальшого розвитку. Структура програми дозволяє доповнювати модель новими підсистемами, зокрема модулями керування вологістю, концентрацією вуглекислого газу або алгоритмами аналізу стану рослин. Таким чином, запропонований інструмент може розглядатися як основа для розширення комп'ютерно-інтегрованої системи керування мікрокліматом тепличного комплексу.

Узгоджене використання SCADA-середовища та спеціалізованого програмного інструменту створює умови для комплексного аналізу процесу керування мікрокліматом. Такий підхід дозволяє поєднати переваги універсальних платформ керування з гнучкістю цільового програмного рішення, зосередженого на конкретному теплотехнічному процесі.

4.3.1 Призначення та загальна структура власної програмної розробки

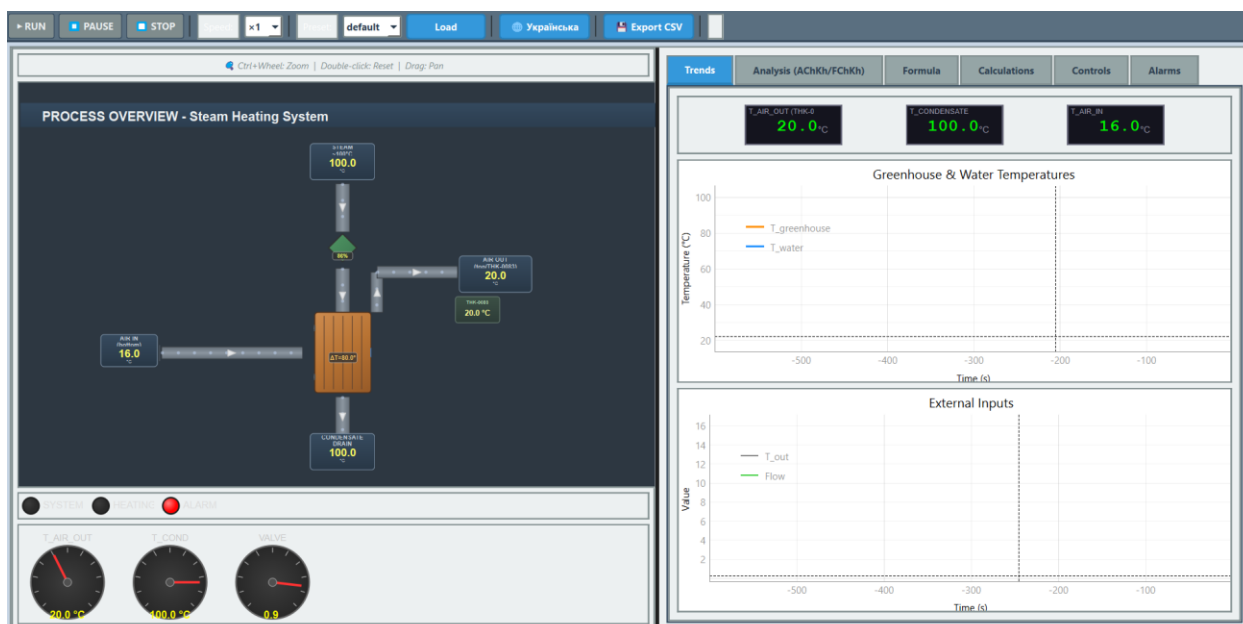
Власна програмна розробка, створена в межах даної роботи, призначена для чисельного моделювання процесу керування мікрокліматом тепличного комплексу та аналізу динамічної поведінки системи у відповідь на зміну уставок і параметрів регулятора. Програма розглядається не як альтернатива промисловим SCADA-системам, а як спеціалізований інструмент, орієнтований на дослідження конкретного теплотехнічного процесу з урахуванням рекуперації тепла.

Основною метою створення власної програмної розробки є забезпечення прозорого та контрольованого середовища для перевірки математичної моделі та алгоритмів керування, сформованих у попередніх розділах роботи. Такий підхід дозволяє зосередитися на фізичній суті процесу, спростити аналіз перехідних режимів і полегшити інтерпретацію отриманих результатів без надлишкових елементів, характерних для універсальних платформ.

Програма побудована за модульним принципом, що забезпечує чіткий розподіл функцій між основними складовими. До її структури входять обчислювальний модуль математичної моделі теплотехнічного процесу, модуль реалізації алгоритму автоматичного регулювання температури, засоби формування уставок і початкових умов, а також модуль візуалізації результатів у часовій області. Така організація відображає класичну структуру замкненого контуру керування і відповідає логіці “об’єкт – регулятор – система спостереження”.

Обчислювальний модуль забезпечує чисельне відтворення динаміки температури повітря в теплиці з урахуванням теплової інерції, теплообміну та впливу керуючого сигналу. Алгоритм регулювання, реалізований у програмі, базується на тих самих принципах, що і в SCADA-реалізації, що дозволяє забезпечити узгодженість результатів та коректне порівняння поведінки системи в різних програмних середовищах.

Окрему роль у структурі програмної розробки відіграє графічний інтерфейс користувача. Він призначений для задання уставок температури,



зміни параметрів регулятора та відображення результатів моделювання у вигляді часових графіків. Графічне представлення процесу спрощує аналіз динаміки системи та дозволяє оперативно оцінювати реакцію на зміну режимів керування.

Інтерфейс програми забезпечує відображення основних параметрів системи в реальному або модельному часі, що дозволяє використовувати розробку як засіб аналізу перехідних процесів. Наявність інтерактивних елементів керування спрощує виконання серії чисельних експериментів, зокрема зміну уставок температури та параметрів регулятора, без втручання у програмну логіку.

Загальна структура власної програмної розробки орієнтована на можливість подальшого розширення. Архітектура дозволяє інтегрувати додаткові підсистеми, наприклад модулі керування вологістю або концентрацією вуглекислого газу, а також алгоритми аналізу якості

Рисунок 4.5 - Головне вікно спеціалізованого програмного інструменту для моделювання процесу керування мікрокліматом

керування. Це створює передумови для використання програмного інструменту не лише в межах даної роботи, а й як основи для розвитку більш складних комп'ютерно-інтегрованих систем керування тепличними комплексами.

Таким чином, власна програмна розробка виконує роль спеціалізованого аналітичного середовища, що доповнює SCADA-реалізацію та забезпечує глибше розуміння динаміки процесу керування мікрокліматом. Її структура та призначення відповідають поставленим у роботі завданням і створюють основу для подальшого аналізу результатів моделювання.

4.3.2 Реалізація математичної моделі та алгоритму керування у власній програмі

Реалізація математичної моделі та алгоритму автоматичного регулювання у власному програмному інструменті ґрунтується на положеннях, сформованих у розділі 3, де було описано теплотехнічний процес та його динамічні властивості. Програмна реалізація забезпечує чисельне відтворення поведінки об'єкта керування у часовій області та дозволяє аналізувати реакцію системи на зміну уставок і зовнішніх збурень.

Математична модель у програмі представлена у вигляді системи рівнянь, що описують зміну температури повітря в теплиці під впливом теплового потоку, сформованого контуром рекуперації тепла. При цьому враховуються теплові втрати, інерційність об'єкта та вплив керуючого сигналу. Чисельне інтегрування рівнянь здійснюється з фіксованим кроком часу, що дозволяє отримувати безперервну часову траєкторію зміни температури.

Алгоритм керування реалізовано у вигляді класичного замкненого контуру автоматичного регулювання. Вхідним сигналом регулятора є різниця між заданим значенням температури та її поточним вимірним значенням, отриманим з моделі об'єкта. На основі цієї різниці формується керуючий сигнал, який інтерпретується як вплив на інтенсивність теплопередачі або витрату теплоносія в теплотехнічному контурі.

У програмі використовується пропорційно-інтегральний регулятор, що забезпечує зменшення статичної похибки та стабілізацію температурного режиму в умовах сталих і повільно змінних збурень. Параметри регулятора задаються користувачем через графічний інтерфейс, що дозволяє аналізувати вплив коефіцієнтів регулювання на характер перехідних процесів.

Trends	Analysis (AChKh/FChKh)	Formula	Calculations	Controls	Alarms
Model Parameters					
K:	80 %				▲ ▼
T1:	120				▲ ▼
T2:	60				▲ ▼
L:	10				▲ ▼
Kz:	2 %				▲ ▼
TambRef:	0				▲ ▼
KUW:	49 %				▲ ▼
TW:	90				▲ ▼
Process Inputs					
T_out (°C):	10				▲ ▼
Flow (valve):	60 %				▲ ▼
dt (timestep):	0,50 s				▲ ▼

Рисунок 4.6 - Головне вікно спеціалізованого програмного інструменту для моделювання процесу керування мікрокліматом

Реалізація математичної моделі та алгоритму керування у власній програмі дозволяє отримати узгоджену поведінку системи з тією, що спостерігається у SCADA-середовищі. Водночас спеціалізований програмний інструмент забезпечує більшу прозорість обчислювального процесу та спрощує аналіз впливу окремих параметрів на динаміку системи.

Таким чином, власна програмна реалізація виконує роль зручного середовища для чисельного аналізу та перевірки працездатності алгоритмів керування, доповнюючи SCADA-модель і створюючи основу для подальшого порівняльного аналізу результатів, який буде наведено у наступному підрозділі.

4.3.3 Аналіз динамічних і частотних властивостей системи керування, реалізованої у власному програмному середовищі

У межах даної роботи власний програмний інструмент використовується як засіб аналізу динамічних властивостей системи керування мікрокліматом тепличного комплексу. На відміну від універсальних SCADA-середовищ, розроблений програмний продукт орієнтований безпосередньо на досліджуваний теплотехнічний процес і реалізує набір аналітичних та графічних засобів для оцінки поведінки системи у часовій та частотній областях.

Аналіз виконано на основі математичної моделі, сформованої у попередніх підрозділах, із використанням однакових параметрів об'єкта керування та алгоритмів регулювання. Це дозволяє коректно порівнювати результати моделювання, отримані у SCADA-середовищі та у власній програмній реалізації.

Аналіз перехідного процесу у часовій області. Для оцінки динамічної реакції системи керування у часовій області в програмному інструменті реалізовано побудову перехідної характеристики температури повітря в теплиці при одиничній зміні керуючого впливу. Такий режим моделювання відповідає типовій задачі аналізу якості автоматичного регулювання та

дозволяє оцінити швидкодію, характер перехідного процесу та наявність перерегулювання.

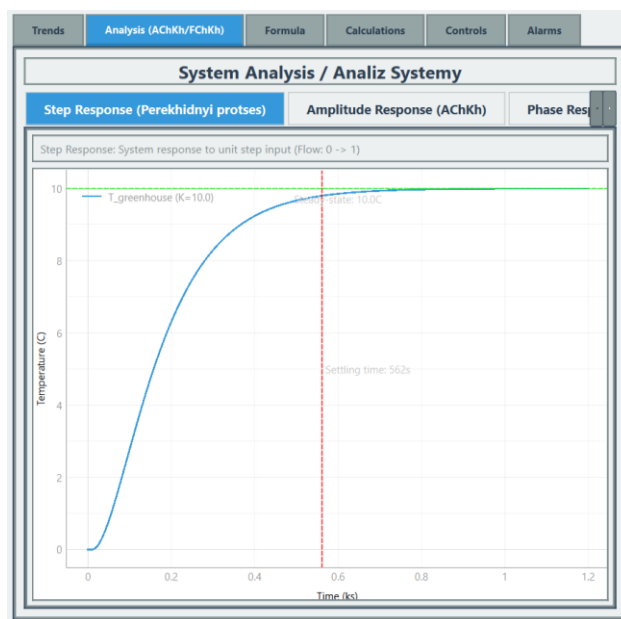


Рисунок 4.7 - Перехідний процес температури повітря в теплиці при одиничній зміні керуючого впливу, отриманий у власному програмному інструменті

Аналіз отриманої часової залежності показує, що система характеризується аперіодичним перехідним процесом без коливань і перевищення усталеного значення температури. Температура плавно зростає від початкового рівня та асимптотично наближається до сталого режиму. Така форма перехідної характеристики є типовою для теплотехнічних об'єктів із значною тепловою інерцією та свідчить про стабільну роботу замкненого контуру керування. Час встановлення температури визначається параметрами математичної моделі та налаштуваннями регулятора і відповідає фізичній природі процесу теплопередачі в тепличному комплексі.

Для поглибленої оцінки властивостей системи керування в

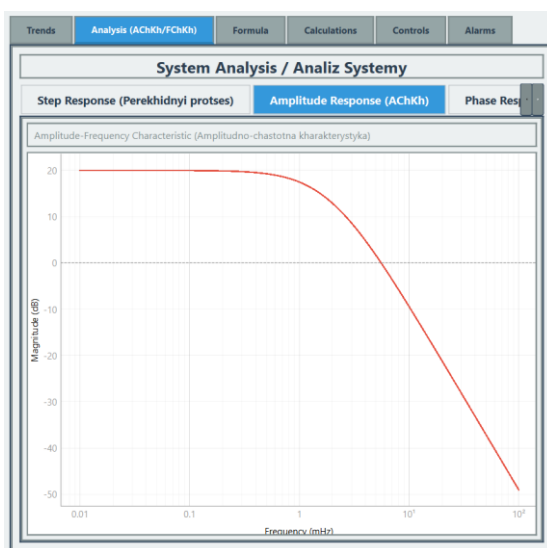


Рисунок 4.8 - Амплітудно-частотна характеристика системи керування, отримана у власному програмному інструменті

програмному інструменті реалізовано аналіз у частотній області. З цією метою побудовано амплітудно-частотну та фазо-частотну характеристики, які дозволяють оцінити реакцію системи на гармонійні збурення різної частоти та зробити висновки щодо її динамічних властивостей.

Амплітудно-частотна характеристика демонструє, що в області низьких частот коефіцієнт підсилення системи залишається практично сталим. Це означає, що система ефективно відпрацьовує повільні зміни температури, характерні для тепличних процесів. Із підвищенням частоти спостерігається поступове зменшення амплітуди, що свідчить про пригнічення швидких збурень та підтверджує фільтрувальні властивості теплотехнічної системи.

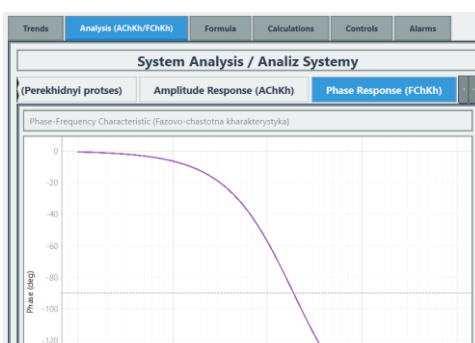


Рисунок 4.9 - Фазо-частотна характеристика системи керування, отримана у власному програмному інструменті

Фазо-частотна характеристика характеризується плавним зменшенням фазового зсуву зі зростанням частоти. Така поведінка узгоджується з теоретичними уявленнями про динаміку інерційних теплотехнічних об'єктів і підтверджує коректність реалізованої математичної моделі. Відсутність різких фазових змін є важливою ознакою стабільної роботи системи керування.

Остаточна оцінка стійкості системи виконана за допомогою діаграми Найквіста, яка відображає комплексну частотну характеристику замкненого

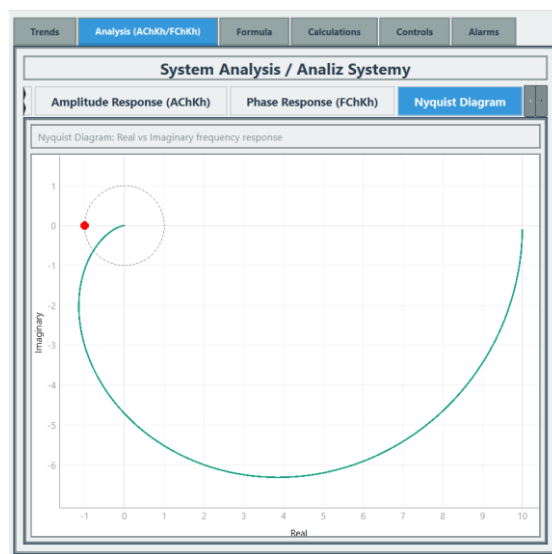


Рисунок 4.10 - Діаграма Найквіста системи керування мікрокліматом тепличного комплексу, отримана у власному програмному інструменті

контуру керування.

Аналіз діаграми Найквіста показує, що траєкторія комплексної частотної характеристики не охоплює критичну точку, що свідчить про стійкість замкненого контуру керування. Наявність запасів стійкості за фазою та амплітудою забезпечує надійну роботу системи при зміні параметрів об'єкта або зовнішніх умов експлуатації.

Узагальнюючи результати, можна зазначити, що власний програмний інструмент дозволяє адекватно відтворювати як часові, так і частотні властивості системи керування мікрокліматом тепличного комплексу.

Отримані характеристики узгоджуються з результатами моделювання у SCADA-середовищі та підтверджують коректність реалізованої математичної моделі й алгоритмів керування. Це дозволяє розглядати розроблений програмний продукт як ефективний спеціалізований інструмент аналізу та моделювання систем керування тепличними комплексами.

4.3.3 Особливості роботи та функціональні можливості власного програмного інструменту

Однією з ключових особливостей власного програмного інструменту є можливість запуску моделі системи керування в імітаційному режимі з повною візуалізацією перебігу процесу. Програмне середовище підтримує керування процесом моделювання за допомогою команд запуску, паузи та зупинки, що дозволяє досліджувати поведінку системи на різних етапах її роботи. Передбачена можливість зміни швидкості імітації, що є особливо важливим для аналізу повільних теплотехнічних процесів, характерних для



Рисунок 4.11 - Запуск імітаційної моделі системи керування мікрокліматом у власному програмному інструменті з візуалізацією технологічного процесу та засобами аналізу

тепличних комплексів.

Під час роботи моделі у реальному часі в інтерфейсі програми відображається структура теплотехнічного контуру системи опалення теплиці, включно з джерелом тепла, теплообмінником, потоками теплоносія та контрольованими параметрами. Поточні значення температури повітря, температури теплоносія та керуючого сигналу регулятора оновлюються безперервно, що дозволяє оператору наочно спостерігати реакцію системи на зміну уставок або зовнішніх умов.

Окрім візуалізації технологічного процесу, програмний інструмент містить розширені аналітичні засоби, реалізовані у вигляді окремих вкладок. Зокрема, передбачено вкладку відображення часових залежностей основних змінних стану системи, що дозволяє аналізувати перехідні процеси та оцінювати якість автоматичного регулювання. Побудова графіків здійснюється безпосередньо в процесі моделювання, що спрощує інтерпретацію результатів і дає змогу оперативно оцінювати вплив параметрів регулятора.

Додатково реалізовано модуль аналізу системи у частотній області, який забезпечує побудову амплітудно-частотної та фазо-частотної характеристик, а також діаграми Найквіста. Перемикання між відповідними режимами аналізу здійснюється без перезавпуску моделі, що дозволяє використовувати програму як інтегрований інструмент для дослідження динамічних і частотних властивостей системи керування.

Важливою функціональною можливістю програми є підтримка експорту результатів моделювання у зовнішні файли для подальшої обробки та документування. Це забезпечує зручність використання програмного інструменту під час підготовки аналітичних матеріалів та виконання порівняльного аналізу з результатами, отриманими в SCADA-середовищі TraceMode.

Таким чином, реалізований програмний інструмент поєднує в собі можливості імітаційного моделювання, візуалізації технологічного процесу

та аналітичної обробки результатів у межах єдиного середовища. Це робить його придатним не лише для перевірки математичної моделі та алгоритмів керування, але й для наочного аналізу роботи системи керування мікрокліматом тепличного комплексу.

4.4 Порівняльний аналіз SCADA TraceMode та спеціалізованої програмної реалізації

У межах даної роботи моделювання та аналіз системи керування мікрокліматом тепличного комплексу виконувались із використанням двох програмних підходів: універсального SCADA-середовища TraceMode та власної спеціалізованої програмної реалізації. Обидва підходи базуються на єдиній математичній моделі та алгоритмах керування, що дозволяє виконати коректний порівняльний аналіз їх функціональних можливостей і результатів моделювання.

SCADA TraceMode орієнтоване насамперед на відтворення логіки реальних промислових систем керування. У цьому середовищі значна увага приділяється імітації апаратної структури, візуалізації технологічних процесів, організації збору даних та взаємодії з оператором. Завдяки цьому TraceMode є зручним інструментом для проєктування та налагодження комп'ютерно-інтегрованих систем керування, що передбачають подальше впровадження у виробниче середовище.

Власна спеціалізована програмна реалізація, розроблена в межах роботи, має іншу спрямованість. Вона орієнтована на детальний аналіз математичної моделі та алгоритмів керування без надлишкових елементів, притаманних універсальним SCADA-системам. Такий підхід дозволяє зосередитися на фізичній суті теплотехнічного процесу, досліджувати динамічні та частотні властивості системи, а також оперативно змінювати параметри моделі та регулятора.

Порівняння результатів моделювання у часовій області показує, що обидва програмні підходи забезпечують узгоджену поведінку системи при

зміні уставок температури. Форма перехідних процесів, час встановлення та характер стабілізації температури є якісно подібними, що свідчить про коректність реалізації математичної моделі та алгоритмів керування в обох середовищах. Невеликі відмінності можуть бути зумовлені особливостями чисельної реалізації та дискретизації часу, однак вони не мають принципового впливу на загальні висновки щодо динаміки системи.

У частотній області спеціалізована програмна реалізація надає більш зручні засоби для аналізу амплітудно-частотних і фазо-частотних характеристик, а також оцінки стійкості за допомогою діаграми Найквіста. Це спрощує інтерпретацію частотних властивостей системи керування та дозволяє безпосередньо пов'язувати отримані результати з параметрами математичної моделі. У SCADA TraceMode такі можливості, як правило, реалізуються опосередковано або потребують додаткових налаштувань, оскільки середовище орієнтоване переважно на технологічну візуалізацію та логіку керування.

З точки зору практичного застосування, SCADA TraceMode є більш придатним для проєктування та експлуатації промислових систем керування, де важливими є надійність, масштабованість і інтеграція з апаратними засобами. Власна програмна реалізація, у свою чергу, доцільна для аналітичних задач, дослідження динаміки процесів, перевірки гіпотез і попереднього налаштування алгоритмів керування.

Таким чином, результати порівняльного аналізу свідчать, що SCADA TraceMode та спеціалізований програмний інструмент не є взаємозамінними, а виконують взаємодоповнювальні функції. Використання обох підходів у межах однієї роботи дозволяє поєднати переваги промислової SCADA-системи та гнучкого аналітичного середовища, що підвищує повноту та обґрунтованість отриманих результатів.

ВИСНОВКИ

У межах виконаної магістерської роботи було комплексно розглянуто проблему побудови та аналізу комп'ютерно-інтегрованих методів керування мікрокліматом тепличних комплексів із використанням рекуперації тепла як енергетичного ресурсу. Робота виходить із усвідомлення того, що сучасний тепличний комплекс є складним теплотехнічним і кіберфізичним об'єктом, у якому тісно переплітаються фізичні процеси теплопередачі, біологічні потреби рослин та алгоритмічні принципи автоматичного регулювання. Саме така багаторівнева природа об'єкта зумовлює необхідність застосування комп'ютерно-інтегрованих підходів, здатних забезпечити узгодженість між реальними процесами, математичним описом і програмною реалізацією системи керування.

У роботі обґрунтовано доцільність використання рекуперованого тепла зовнішніх технологічних процесів для опалення тепличних споруд як з позиції енергоефективності, так і з точки зору стабільності теплового режиму. Показано, що вторинне тепло, за умови коректної інтеграції через теплообмінні апарати та циркуляційні контури, може розглядатися не як допоміжне, а як повноцінне джерело енергії, динаміка якого підлягає керуванню. При цьому ключовою особливістю такого підходу є наявність значної теплової інерції та запізнення, що безпосередньо впливає на характер перехідних процесів у системі керування і потребує відповідного алгоритмічного забезпечення.

Побудована математична модель теплотехнічного контуру теплиці дозволила формалізувати взаємозв'язок між керуючим впливом, температурою теплоносія та температурою повітря всередині теплиці. Отриманий опис відображає акумулюючі властивості системи, теплові втрати та інерційний характер об'єкта керування. На основі цієї моделі сформовано алгоритми регулювання, орієнтовані на підтримання заданого температурного режиму за умов змінних зовнішніх та внутрішніх збурень.

Таким чином, математичний апарат у роботі не є абстрактним, а слугує безпосередньою основою для програмної реалізації та подальшого аналізу.

Програмна реалізація системи керування в SCADA-середовищі TraceMode продемонструвала можливість наочного та структурованого відтворення теплотехнічного процесу разом із алгоритмами автоматичного регулювання. Візуальна модель, побудована в SCADA, дозволяє поєднати фізичну структуру об'єкта з інформаційними потоками, забезпечуючи одночасний контроль параметрів у ключових точках та відображення їх динаміки у часі. Такий підхід є особливо цінним на етапах проєктування та експлуатаційного аналізу, оскільки дає змогу оперативно оцінювати поведінку системи, виявляти критичні режими та коригувати налаштування без втручання у реальний технологічний процес.

Аналіз часових залежностей, отриманих у SCADA TraceMode, показав, що система керування забезпечує стійкий вихід на задану уставку температури без небажаних коливань і перерегулювань. Характер керуючого сигналу регулятора свідчить про його узгодженість із динамічними властивостями об'єкта, що зменшує навантаження на виконавчі механізми та підвищує надійність системи в умовах тривалої експлуатації. Зафіксоване запізнення між зміною керуючого впливу та реакцією температури теплоносія підтверджує адекватність прийнятої моделі та відповідає фізичній природі теплотехнічного процесу.

Разом із SCADA-підходом у роботі було реалізовано власний спеціалізований програмний інструмент для моделювання та аналізу процесу керування мікрокліматом теплиці. Цей інструмент створено як логічне продовження математичної моделі і він орієнтований не на універсальність, а на глибоке опрацювання конкретного процесу. Власна програмна реалізація поєднує імітаційне моделювання, побудову часових графіків, аналіз у частотній області та інтерактивну зміну параметрів регулятора в межах

єдиного середовища. Такий підхід дозволяє значно скоротити шлях від теоретичного аналізу до практичного експерименту з моделлю.

Отримані у власному програмному інструменті результати підтвердили загальні закономірності, виявлені у SCADA TraceMode, водночас надавши додаткові можливості для аналітичного дослідження системи. Зокрема, аналіз у частотній області дозволив оцінити запас стійкості, фазові характеристики та чутливість системи до параметричних змін, що є складно реалізованим у класичних SCADA-середовищах без зовнішніх модулів. Таким чином, власна програма не дублює функціональність TraceMode, а доповнює її, формуючи інженерний інструмент для поглибленого аналізу.

Порівняльний аналіз двох програмних підходів показав, що SCADA TraceMode доцільно використовувати як середовище для побудови комп'ютерно-інтегрованих систем із акцентом на візуалізацію, диспетчеризацію та взаємодію з оператором, тоді як спеціалізований програмний інструмент є ефективним засобом для дослідницьких і проєктних завдань, пов'язаних із моделюванням, аналізом та оптимізацією алгоритмів керування. Їх поєднання створює цілісну методологію, у межах якої можливе як наочне відтворення процесу, так і глибоке теоретичне осмислення його динаміки.

Загалом результати роботи свідчать про те, що застосування комп'ютерно-інтегрованих методів керування мікрокліматом тепличних комплексів із використанням рекуперації тепла є технічно доцільним, енергетично обґрунтованим і перспективним з точки зору подальшого розвитку. Запропонований підхід забезпечує узгодження між фізичною моделлю процесу, алгоритмами регулювання та програмною реалізацією, що створює основу для масштабування системи, інтеграції додаткових параметрів мікроклімату та впровадження інтелектуальних методів керування у тепличному виробництві наступного покоління.

ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ

1. Стенцель Й.І., Поркуян О.В. Автоматизація технологічних процесів хімічних виробництв. Підручник. – Луганськ: Вид-во Східноукр. нац. ун-ту, 2009. – 285 с
2. Математичне моделювання технологічних об'єктів керування: Навч.посібник/ Й.І.Стенцель. – К.: ІСДО, 1993. – 328 с.
3. Методичні вказівки до виконання курсової роботи з курсу "Автоматизація технологічних процесів галузі" / Упоряд. І.І. Стенцель, А.І. Шевчук. – Дніпропетровськ: ДХТІ, 1989. – 32 с.
4. Методичні вказівки до виконання курсового проєкту з дисципліни «Технологічні вимірювання та прилади» / І.П. Кушнарєнко, В.Л. Зельманзон. – Северодонецк.: СТИ, 2000. – 43 с.
5. Стенцель Й.І. Автоматизація технологічних процесів хімічних виробництв: Навч. посібник. – К.: ІСДО. 1995. – 360 с.
6. Автоматизація технологічних процесів. Позначення умовних приладів та засобів автоматизації у схемах / Гуров А.М., Антонова А.М., Клеванський І.А., Львова В.Д., Тимофєєв Я.Г., 1985.
7. Короткий довідник фізико-хімічних величин. Вид. 8-е, перероб. / За ред. А. А. Равделя та А. М. Пономарьової. – Л.: Хімія, 1983. – 232 с.
8. Постійний технологічний регламент виробництва карбаміду.
9. Засоби автоматизації технологічних процесів. Номенклатурний каталог – Івано-Франківськ.: Мікрол 2002 – 2003.
10. Теплиці в 15 разів продуктивніші за відкритий ґрунт. <https://superagronom.com/news/12307-teplitsi-v-15-raziv-produktivnishii-za-vidkritiy-grunt--naukovets/> (дата звернення 15.05.24).
11. Кабінет Міністрів України. Комплексна державна програма енергозбереження України. Постанова, Програма від 05.02.1997 № 148.

12. Л.В. Лисак, В.А. Маляренко. Енергетика довкілля енергозбереження. Харків, «Рубікон», 2004. – 360 с.
13. Кудрі С.О. Відновлювані джерела енергії. Київ: Інститут відновлюваної енергетики НАНУ. 2020 р. – 388 с.
14. Дзядикевич Ю.В., Буряк М.В., Розум Р.І. Енергетичний менеджмент. Тернопіль: Економічна думка, 2010 р. – 295 с.
15. Т. М. Стукан. Дисертація: Економічний механізм публічного управління інноваційним розвитком аграрних підприємств. Харків. 2021 р. – 257 с.
16. Провітрювання в теплиці. <https://teplicapro.com/uk/article/provitruvanna-v-teplici/> (дата звернення 06.06.24).
17. Методи і засоби агрометеорологічних вимірювань параметрів ґрунтів. <https://uhmi.org.ua/rozh/agro/> (дата звернення 25.05.24).
18. Штучний інтелект у виробництві. <https://mediacom.com.ua/shi-u-virobnitstvi-avtomatizatsiya-ta-innovatsii-vazhlivist-ta-perevagi/> (дата звернення 23.05.24).
19. Борис Додонов. Моніторинг енергоефективності України. Київ. 2015 р. – 18 с.
20. Ключові напрями енергозбереження в сільському господарстві. Градовий Василь. м. Тернопіль. 2020 р. – 34-24 с.
21. Електрообладнання та засоби автоматизації сільськогосподарської техніки. методичні рекомендації. Д. Д. Марченко. Миколаїв 2021 р. -С 106.
22. Велика Українська енциклопедія. Аміачна селітра. https://vue.gov.ua/Аміачна_селітра (дата звернення 15.05.24)
23. Технологія зв'язаного азоту і хімічних добрив технологія та алгоритми розрахунків виробництва азотних добрив. А.Л. Концевой. Київ КПІ ім. Ігоря Сікорського. 2019 р. – 227 с.

24. 76-а науково-практична конференція. Енергозабезпечення, електротехнології, електротехніка та інтелектуальні управляючі системи в АПК. НУБіП України. Київ. 2023 р. – 207 с.
25. Целіщев О.Б., Єлісєєв П.Й., Лорія М.Г., Захаров І.І. Математичне моделювання технологічних об'єктів. Підручник. Луганськ, Вид-во Східноукр. нац. ун-ту. 2011. – 421 с.
26. Silke Hemming. Systematic design of greenhouse crop production systems. INCOSE. 2008 p. – 15 с.
27. Овочі зросли у ціні на 150% через окупацію регіонів на півдні України. На що буде дефіцит цього сезону? <https://www.stopcor.org/ukr/section-suspilstvo/news-ovochi-zrosli-u-tsini-na-150-cherez-okupatsiyu-regioniv-na-pivdni-ukraini-na-scho-bude-defitsit-tsogo-sezonu-23-05-2022.html> (дата звернення 23.05.24).
28. Томат Мінопріо F1 250. <https://10sotok.com.ua/ua/tomat-minoprio-f1-250-semyan.html> (дата звернення 23.05.24).
29. S. Y. Chia, M. W. Lim. A critical review on the influence of humidity for plant growth forecasting. 33rd Symposium of Malaysian Chemical Engineers (SOMChE 20230.2). 2022 рік. – 7 с.
31. Megha Poudel, Bruce Dunn. Greenhouse Carbon Dioxide Supplementation. Division of Agricultural Sciences and Natural Resources. Oklahoma State University. 2023 p. – 5 с.
32. Rabobank Research. EU Greenhouse Sector Outlook 2015–2025. – Rabobank, Utrecht, 2023. – 56 p.
33. National Research Council. Greenhouse Heating and Ventilation. – NRC, Ottawa, 2021. – 65 p.
34. Pearson S., Hadley P., Wheldon A. Modeling microclimate in glasshouses. – J. of Agricultural Engineering Research. – 2020. – Vol. 45(2). – pp. 105–124.

35. Evaluating feasibility of a sustainable greenhouse heating through energy recovery from a waste-to-energy plant. – WIT Transactions on Ecology and the Environment, 2003. – Vol. 61. – P. 123–132
36. Health and Safety Executive (HSE). Land Use Planning Methodology. – United Kingdom, 2023. – <https://www.hse.gov.uk> (дата звернення: 10.12.2025).
37. Про затвердження Правил охорони праці при переробці, зберіганні та транспортуванні аміачної селітри : наказ. – Верховна Рада України, 2009. – <https://rada.gov.ua> uk (дата звернення: 10.12.2025).
38. Loibl W., et al. Residential heat supply by waste-heat re-use. – Energy Policy, 2015. – P. 1–12. – ResearchGate.
39. Rezaei F., et al. Spatial optimization of industrial symbiosis for greenhouse heat supply. – Energy Systems, 2024. – ETH Zurich.
40. United Nations Economic Commission for Europe (UNECE). Guidance on land-use planning, the siting of hazardous facilities and related safety aspects. – Geneva, 2019. – <https://unece.org> (дата звернення: 10.12.2025).
41. ASHRAE Handbook – HVAC Applications. – ASHRAE, 2020. – 1830 p.
42. Bochkovskiy A., Wang C.-Y., Liao H.-Y. YOLOv4: Optimal Speed and Accuracy of Object Detection. arXiv:2004.10934, 2020.
43. Cengel Y.A. Heat and Mass Transfer: A Practical Approach. – McGraw-Hill, 2020. – 902 p.
44. Duffie J.A., Beckman W.A. Solar Engineering of Thermal Processes. – 4th Ed. – Wiley, 2021. – 910 p.
45. FAO Greenhouse Gas & Energy Efficiency Report. – FAO, Rome, 2023. – 92 p.
46. Incropera Frank P., DeWitt David P. Fundamentals of Heat and Mass Transfer. – 7th Ed. – Wiley, 2019. – 1048 p.
47. ISO 10218-2: Safety requirements for industrial automation systems. – ISO, 2022.

48. Kaptein R., Voogt W. Heat balance and energy distribution in horticultural greenhouses. – Wageningen UR, 2020. – 71 p.
49. Kittas C., Bartzanas T. Greenhouse Climate Control in Mediterranean Conditions: Current Technologies and Future Trends. // *Applied Engineering in Agriculture*. – 2021. – Vol. 37(3). – pp. 385–398.
50. Mougou C., CO₂ Enrichment in Modern Greenhouses. – *Acta Horticulturae*, 2021. – Vol. 1378. – pp. 33–48.