

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
Західноукраїнський національний університет
Факультет комп'ютерних інформаційних технологій
Кафедра спеціалізованих комп'ютерних систем

ПОЗНЯК Богдан Вікторович

**Мікропроцесорна система управління мікрокліматом
овочесховища/ Microprocessor microclimate management
system of vegetable storage**

спеціальність: 151 – Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані
технології

освітньо-професійна програма – Автоматизація та комп'ютерно-
інтегровані технології

Кваліфікаційна робота

Виконав студент групи АКІТ - 41
Б.В. Позняк

Науковий керівник
к.т.н., доцент П.В. Гуменний

Кваліфікаційну роботу допущено
до захисту:

« ____ » _____ 2026 р.

Завідувач кафедри

_____ А.І.Сегін

ТЕРНОПІЛЬ – 2026

АНОТАЦІЯ

Позняк Б.В. Мікропроцесорна система управління мікрокліматом овочесховища. – Рукопис.

Дослідження на здобуття освітнього ступеня «бакалавр» за спеціальністю 151 «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології», освітньо-професійна (наукова) програма. – Західноукраїнський національний університет, Тернопіль, 2026.

У роботі проведено аналіз технологічного процесу зберігання овочевої продукції та визначено систему управління мікрокліматом овочесховища як об'єкт автоматизації. Розроблено мікропроцесорну систему управління мікрокліматом, яка забезпечує автоматизований контроль і регулювання температури, відносної вологості та концентрації вуглекислого газу. Виконано побудову математичної моделі об'єкта управління. Реалізовано структурну та принципову схеми системи, SCADA-архітектуру моніторингу, а також розроблено програмне забезпечення для моделювання процесів керування.

ANNOTATION

Pozniak B.V. Microprocessor microclimate management system of vegetable storage. - Manuscript.

Doctoral studies for the education level «Bachelor'» with the title 151 Automation and Computer-Integrated Technologies. – West Ukrainian National University, Ternopil, 2026.

The work presents an analysis of the technological process of vegetable storage and identifies the vegetable storage microclimate control system as an object of automation. A microprocessor-based microclimate control system has been developed to provide automated monitoring and regulation of temperature, relative humidity, and carbon dioxide concentration. A mathematical model of the control object has been constructed. The structural and electrical schematic diagrams of the system have been developed, a SCADA-based monitoring architecture has been implemented, and software for simulating control processes has been created.

Західноукраїнський національний університет
Факультет комп'ютерних інформаційних технологій
Кафедра спеціалізованих комп'ютерних систем
Освітній ступінь "бакалавр"
спеціальність:151 – Автоматизація, комп'ютерно-інтегровані технології
освітньо-професійна програма – Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри ККС

_____ А.І.Сегін
“ ____ ” _____ 20__ р.

**З А В Д А Н Н Я
НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ СТУДЕНТУ**

ПОЗНЯК Богдан Вікторович

(прізвище, ім'я по-батькові)

1. Тема кваліфікаційної роботи

_____ Мікропроцесорна система управління мікрокліматом овочесховища/
Microprocessor microclimate management system of vegetable storage _____

_____ керівник роботи _____ к.т.н., доцент П.В. Гуменний _____
затверджені наказом по університету від 01 грудня 2025 р. № 894 _____

2. Строк подання студентом закінченої кваліфікаційної роботи

25 травня 2026р.

3. Вихідні дані до кваліфікаційної роботи:

- _____ 1. Технологічний процес управління мікрокліматом овочесховища. _____
- _____ 2. Будова та характеристики системи керування мікрокліматом овочесховища. _____
- _____ 3. Принцип дії та будова систем керування мікрокліматом. _____
- _____ 4. Існуючі автоматизовані системи керування мікрокліматом овочесховища. _____

4. Основні питання, які потрібно розробити

- _____ 1. Аналіз технологічного процесу та визначення об'єкта автоматизації. _____
- _____ 2. Проектування автоматизованої системи керування вентиляцією фарбувальної камери. _____
- _____ 3. Реалізація автоматизованої системи керування вентиляцією фарбувальної камери. _____

5. Перелік графічного матеріалу у роботі

- _____ 1. Технологічний процесу управління мікрокліматом. _____
- _____ 2. Мікропроцесорна система управління мікрокліматом овочесховища. _____
- _____ 3. Схема SCADA для керування овочесховищем. _____

6. Консультанти розділів кваліфікаційної роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		Завдання видав	Завдання прийняв
1	П.В. Гуменний к.т.н., доцент, доцент кафедри СКС		
2	П.В. Гуменний к.т.н., доцент, доцент кафедри СКС		
3	П.В. Гуменний к.т.н., доцент, доцент кафедри СКС		

7. Дата видачі завдання 01 грудня 2025р.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назви етапів кваліфікаційної роботи	Строк виконання етапів роботи	Примітка
1	Проведення аналізу технологічного процесу та визначення об'єкта автоматизації	01.12.2025р. – 15.01.2026р.	
2	Проектування автоматизованої системи керування мікрокліматом овочесховища	16.01.2026р. – 15.03.2026р.	
3	Реалізація автоматизованої системи керування мікрокліматом овочесховища	16.03.2026р. – 30.04.2026р.	
4	Остаточне оформлення та подача кваліфікаційної роботи на перевірку щодо плагіату	01.05. 2026р. – 25.05.2026р.	

Студент

(підпис)

Б.В. Позняк

Керівник роботи

(підпис)

к.т.н., доцент П.В. Гуменний

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ.....	5
ВСТУП.....	6
1. АНАЛІЗ ПРЕДМЕТНОЇ ОБЛАСТІ.....	9
1.1 Характеристика етапів технологічного процесу управління мікрокліматом овочесховища	9
1.2 Існуючі системи управління мікрокліматом овочесховищ	11
1.3 Основні параметри контролю та постановка завдання для побудови схеми керування мікрокліматом овочесховища	16
2. ПОБУДОВА СИСТЕМИ УПРАВЛІННЯ МІКРОКЛІМАТОМ ОВОЧЕСХОВИЩА	20
2.1 Компоненти системи управління мікрокліматом овочесховища	20
2.2 Побудова автоматизованої системи контролю	27
2.3 Побудова архітектури SCADA для керування овочесховищем	29
3. РЕАЛІЗАЦІЯ ТА ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЕКТОВАНОЇ СИСТЕМИ	32
3.1 Модель об'єкту регулювання	32
3.2 Побудова моделі САР температури овочесховища.....	34
3.3 Дослідження стійкості САР температури овочесховища	39
3.4 Програмне забезпечення системи управління мікрокліматом.....	45
ВИСНОВКИ.....	48
ПЕРЕЛІК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	49

					ДП.АКІТ.10658691.00.00.000ПЗ								
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата									
Розроб.		Позняк Б.В.			Мікропроцесорна система управління мікрокліматом овочесховища/ Microprocessor microclimate management system of vegetable storage			Літ.		Арк.		Акрушіє	
Перевір.		Гуменний П.В.								4		51	
Консульт.		Гуменний П.В.						ЗУНУ.ФКІТ.АКІТ-41					
Н. Контр.		Заставний О.М.											
Затверд.		Сегін А.І.											

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ

CO₂ – діоксид вуглецю;

HMI – Human-Machine Interface (інтерфейс взаємодії людини з машиною);

PI – Proportional-Integral Controller (пропорційно-інтегральний регулятор);

PID – Proportional-Integral-Derivative Controller (пропорційно-інтегрально-диференціальний регулятор);

PLC – Programmable Logic Controller (програмований логічний контролер);

SCADA – Supervisory Control and Data Acquisition (система диспетчерського керування та збору даних);

АЦП - аналого-цифровий перетворювач;

ПЛК - програмований логічний контролер;

ТП - технологічний процес.

					ДП.АКІТ.10658691.00.00.000ПЗ	Арк.
						5
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		

ВСТУП.

Актуальність теми. Забезпечення продовольчої безпеки та мінімізація післязбиральних втрат сільськогосподарської продукції є одним із ключових завдань агропромислового комплексу. Значна частина овочевої продукції втрачається на етапі зберігання внаслідок порушення температурно-вологісного режиму, недостатньої вентиляції, конденсації вологи та розвитку мікробіологічних процесів. Ефективне функціонування овочесховищ безпосередньо залежить від стабільності параметрів мікроклімату, до яких належать температура повітря, відносна вологість, концентрація вуглекислого газу та швидкість повітрообміну[1].

Традиційні системи контролю мікроклімату часто базуються на дискретних регуляторах або потребують постійного втручання обслуговуючого персоналу, що знижує точність підтримання заданих режимів і підвищує експлуатаційні витрати. Сучасний етап розвитку автоматизованих систем керування характеризується широким впровадженням мікропроцесорних засобів, які забезпечують адаптивність, програмну гнучкість, інтеграцію сенсорних підсистем і можливість реалізації складних алгоритмів регулювання. Використання мікроконтролерів дозволяє здійснювати безперервний моніторинг параметрів середовища, аналізувати відхилення від нормативних значень та формувати керуючі впливи на виконавчі механізми в режимі реального часу.

Розроблення мікропроцесорної системи управління мікрокліматом овочесховища є актуальним науково-прикладним завданням, що поєднує питання автоматизації технологічних процесів, сенсорики, алгоритмічного забезпечення та енергетичної ефективності. Створення структурно та функціонально обґрунтованої схеми такої системи дозволяє підвищити точність регулювання, зменшити втрати продукції та забезпечити стабільність умов зберігання відповідно до агротехнічних вимог.

Мета кваліфікаційної роботи: є розроблення та структурно-функціональне обґрунтування схеми мікропроцесорної системи управління мікрокліматом овочесховища, яка забезпечує автоматизований контроль і

					ДП.АКІТ.10658691.00.00.000ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		6

регулювання температури, відносної вологості та параметрів вентиляції шляхом реалізації алгоритмів обробки даних із сенсорних модулів і формування керуючих сигналів для виконавчих пристроїв з урахуванням вимог до енергоефективності, надійності та стабільності технологічного процесу зберігання овочевої продукції.

Для досягнення поставленої мети необхідно:

- Проаналізувати технологічний процес зберігання овочевої продукції та визначити основні параметри мікроклімату овочесховища.
- Дослідити існуючі системи управління мікрокліматом овочесховищ та виконати аналіз їхніх функціональних особливостей.
- Розробити структурну та принципову схеми автоматизованої системи управління мікрокліматом овочесховища.
- Обґрунтувати вибір апаратних компонентів системи управління, включаючи датчики, контролери та виконавчі механізми.
- Побудувати математичну модель об'єкта управління відповідно до положень класичної теорії автоматичного управління.
- Виконати дослідження стійкості та динамічних характеристик системи автоматичного регулювання.
- Розробити програмне забезпечення для емуляції процесів управління мікрокліматом овочесховища та побудови графіків зміни параметрів системи.

Об'єкт дослідження – процес управління мікрокліматом овочесховища в умовах автоматизованого регулювання температури, вологості та параметрів повітрообміну.

Предмет дослідження – методи, алгоритми та технічні засоби мікропроцесорного управління параметрами мікроклімату овочесховища, а також динамічні характеристики системи автоматичного регулювання.

Методи дослідження – методи теорії автоматичного управління, математичного моделювання, аналізу динамічних систем, комп'ютерного моделювання технологічних процесів, а також методи програмної реалізації та візуалізації результатів моделювання.

					ДП.АКІТ.10658691.00.00.000ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		7

Практичне значення одержаних результатів полягає у розробленні структурної та принципової схем системи управління мікрокліматом овочесховища, виборі апаратних компонентів системи та створенні програмного забезпечення для емуляції процесів автоматичного регулювання і дослідження динамічних характеристик системи.

Публікації та апробація. Позняк Б., Посвятовська О., Мікропроцесорна система управління мікрокліматом овочесховища. Збірник матеріалів всеукраїнської науково-практичної конференції «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології» (АКІТ - 2026), Тернопіль, 2026. С.165-171.

					ДП.АКІТ.10658691.00.00.000ПЗ	Арк.
						8
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		

1. АНАЛІЗ ПРЕДМЕТНОЇ ОБЛАСТІ

1.1 Характеристика етапів технологічного процесу управління мікрокліматом овочесховища

Характеристика етапів технологічного процесу управління мікрокліматом овочесховища базується на необхідності забезпечення стабільних параметрів внутрішнього середовища, які гарантують збереження фізіологічної якості овочевої продукції протягом усього періоду зберігання. Технологічний процес має безперервний характер і передбачає послідовне виконання операцій контролю, аналізу та регулювання параметрів повітряного середовища відповідно до біологічних особливостей продукції, що зберігається.

Початковий етап технологічного процесу пов'язаний із підготовкою сховища до завантаження продукції та формуванням необхідного температурно-вологісного режиму до моменту розміщення овочів. На цьому етапі здійснюється попереднє охолодження внутрішнього об'єму приміщення, перевірка працездатності вентиляційного обладнання, холодильних агрегатів, нагрівальних елементів і систем контролю. Одночасно проводиться калібрування вимірювальних каналів, перевірка справності датчиків температури, відносної вологості, концентрації вуглекислого газу та параметрів повітрообміну. Формування початкових умов зберігання є критично важливим, оскільки навіть короткочасне відхилення параметрів може негативно вплинути на подальшу стабільність технологічного режиму.

Наступний етап пов'язаний із завантаженням продукції та переходом системи до режиму стабілізації мікроклімату. Після внесення овочевої продукції у сховище відбувається зміна теплового та вологісного балансу внутрішнього середовища внаслідок дихальних процесів, виділення вологи та тепла. У цей період система автоматичного керування забезпечує інтенсивний моніторинг параметрів середовища та виконує адаптацію режимів роботи вентиляційних і холодильних установок відповідно до фактичного теплового навантаження. Особливу роль відіграє контроль рівномірності розподілу температури у різних

					ДП.АКІТ.10658691.00.00.000ПЗ	Арк.
						9
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		

зонах сховища, що дозволяє запобігати локальним перегрівам і конденсації вологи.

Основний технологічний етап полягає у тривалому підтриманні нормативного мікроклімату протягом усього періоду зберігання. На цьому етапі система функціонує в замкненому циклі автоматичного регулювання, у якому датчики безперервно реєструють параметри середовища, а мікропроцесорний контролер виконує порівняння поточних значень із заданими уставками. За результатами аналізу формуються керуючі сигнали для холодильних агрегатів, вентиляційних вентиляторів, нагрівальних елементів, зволожувачів або осушувачів. Регулювання здійснюється з урахуванням динаміки змін температури зовнішнього середовища, сезонних коливань та інтенсивності біохімічних процесів у продукції. У випадку перевищення допустимих меж концентрації вуглекислого газу система активує режим посиленого повітрообміну для стабілізації газового складу атмосфери.

Окремим функціональним етапом є вентиляційний режим, спрямований на забезпечення рівномірного переміщення повітря через масу продукції. Вентиляція виконує одночасно функцію тепловідведення, регулювання вологості та видалення продуктів дихання овочів. Інтенсивність роботи вентиляційної системи визначається поточними значеннями температури, вологості та концентрації CO₂, а також зовнішніми кліматичними умовами. При цьому система керування повинна враховувати ризик переохолодження або надмірного висушування продукції, що вимагає точного узгодження режимів роботи вентиляторів і холодильного обладнання.

Завершальний етап технологічного процесу пов'язаний із контролем аварійних станів і підтриманням функціональної безпеки системи. У разі відмови датчиків, перевищення критичних температурних меж, порушення роботи холодильного агрегату або вентиляційного обладнання система переходить у режим аварійного реагування, активує сигнали попередження та формує відповідні повідомлення оператору або на SCADA-рівень(рисунок 1.1). Це дозволяє мінімізувати ризик втрати продукції та забезпечити безперервність технологічного процесу навіть у нестандартних умовах.

					ДП.АКІТ.10658691.00.00.000ПЗ	Арк.
						10
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		



Рисунок 1.1 - Технологічного процесу управління мікрокліматом

Таким чином, технологічний процес управління мікрокліматом овочесховища є багатостадійним і динамічним, а його ефективність визначається точністю вимірювання параметрів, швидкістю обробки інформації, адаптивністю алгоритмів регулювання та узгодженістю роботи всіх функціональних елементів автоматизованої системи

1.2 Існуючі системи управління мікрокліматом овочесховищ

Вентиляційні системи є базовим елементом управління мікрокліматом овочесховищ. Їх основною функцією є забезпечення рівномірної циркуляції повітря через масу продукції, вирівнювання температури у різних зонах сховища та видалення продуктів дихання рослин. Такі системи можуть працювати у режимах рециркуляції, провітрювання або активного охолодження залежно від стану зовнішнього середовища та температури продукції.

Повітря подається у сховище через спеціальні вентиляційні канали або підлогові повітропроводи, після чого проходить крізь шар продукції та повертається до вентиляційної камери. Тут воно змішується із зовнішнім повітрям, після чого його температура і вологість регулюються за допомогою заслінок, нагрівачів або охолоджувачів. Подібна система дозволяє ефективно знижувати температуру продукції після збору врожаю та підтримувати її на стабільному рівні під час зберігання.

У сучасних овочесховищах вентилятори часто обладнуються частотними перетворювачами, що дає змогу плавно змінювати інтенсивність повітряного потоку(рисунок 1.2) та оптимізувати енергоспоживання системи.

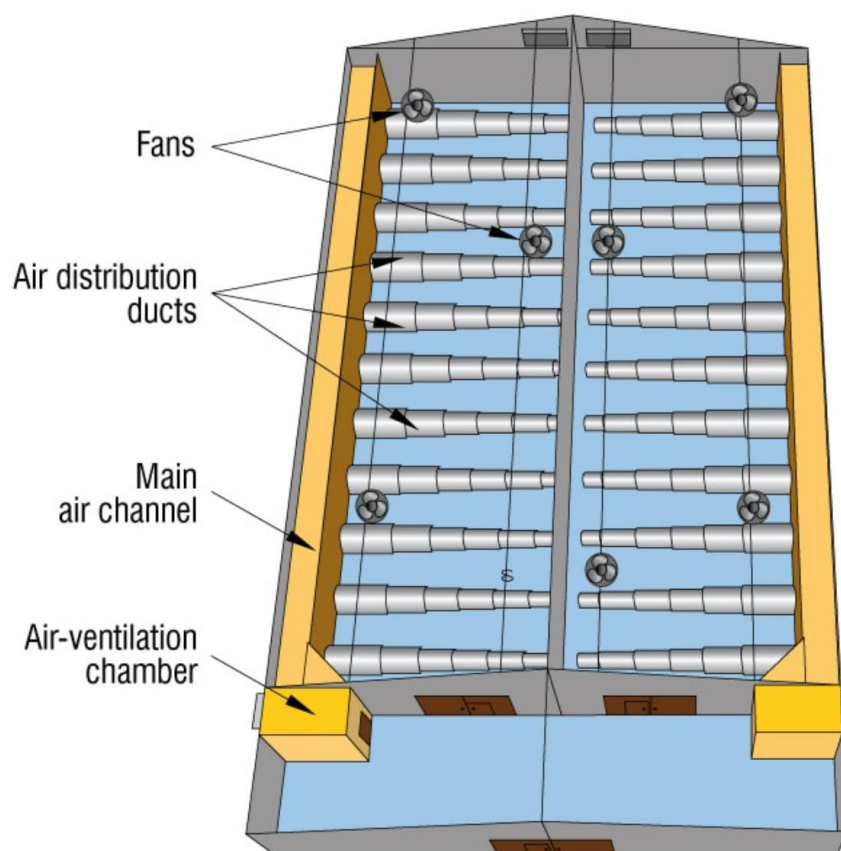


Рисунок 1.2 - Вентилятори обладнані частотними перетворювачами

Холодильні системи (рисунок 1.3) застосовуються для підтримання стабільного температурного режиму у сховищах, особливо в умовах підвищеної температури зовнішнього середовища або під час швидкого охолодження продукції після збору врожаю. Типова холодильна установка складається з компресора, конденсатора, випарника та системи автоматичного керування.

					ДП.АКІТ.10658691.00.00.000ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		12



Рисунок 1.3 - Системи вентиляції та повітрообміну

Принцип роботи такої системи базується на відведенні тепла з внутрішнього об'єму сховища за допомогою холодоагенту, який циркулює у замкненому контурі. Повітря у камері проходить через випарник, де охолоджується, після чого вентилятори рівномірно розподіляють його по всьому приміщенню. Завдяки цьому підтримується стабільна температура, необхідна для довготривалого зберігання овочів.

Застосування холодильних систем у сховищах (рисунок 1.4) дозволяє суттєво сповільнити біохімічні процеси у продукції та зменшити розвиток мікроорганізмів, що безпосередньо впливає на збільшення терміну зберігання та зменшення втрат урожаю.

У сучасних системах часто використовуються екологічні холодоагенти, зокрема вуглекислий газ або аміак, що дозволяє зменшити енергоспоживання і підвищити ефективність холодильних установок.

					ДП.АКІТ.10658691.00.00.000ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		13



Рисунок 1.4 - Холодильні системи овочесховищ

Сучасні системи управління мікрокліматом овочесховищ базуються на використанні автоматизованих контролерів або програмованих логічних контролерів (PLC). Такі системи виконують функції збору даних від датчиків температури, вологості, концентрації вуглекислого газу та інших параметрів середовища.

На основі отриманої інформації контролер аналізує поточний стан мікроклімату та формує керуючі сигнали для виконавчих механізмів, включаючи вентилятори, холодильні установки, нагрівачі та зволожувачі. Система може працювати у декількох режимах, зокрема режимі рециркуляції, вентиляції, охолодження, зволоження або осушення повітря, що дозволяє підтримувати оптимальні умови зберігання різних видів овочевої продукції.

У сучасних системах керування широко застосовуються SCADA-системи, які забезпечують централізований моніторинг параметрів сховища(рисунок 1.5), архівацію технологічних даних та віддалений доступ до системи через мережу Інтернет.

					ДП.АКІТ.10658691.00.00.000ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		14



Рисунок 1.5 - Системи автоматичного контролю та регулювання

Окремим напрямком розвитку технологій зберігання овочів є системи з контрольованою атмосферою. У таких сховищах, крім температури та вологості, регулюється газовий склад повітря, зокрема концентрація кисню та вуглекислого газу.

Зменшення концентрації кисню та підвищення концентрації CO_2 дозволяє сповільнити процеси дихання рослинної продукції, що значно подовжує термін її зберігання. Для реалізації таких технологій використовуються газоаналізатори, системи подачі азоту або вуглекислого газу, а також герметичні камери з автоматичним регулюванням атмосфери.

Застосування систем контрольованої атмосфери широко використовується у великих аграрних підприємствах та логістичних центрах (рисунк 1.6), де необхідно забезпечити тривале зберігання овочів і фруктів із мінімальними втратами якості.

					ДП.АКІТ.10658691.00.00.000ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		15

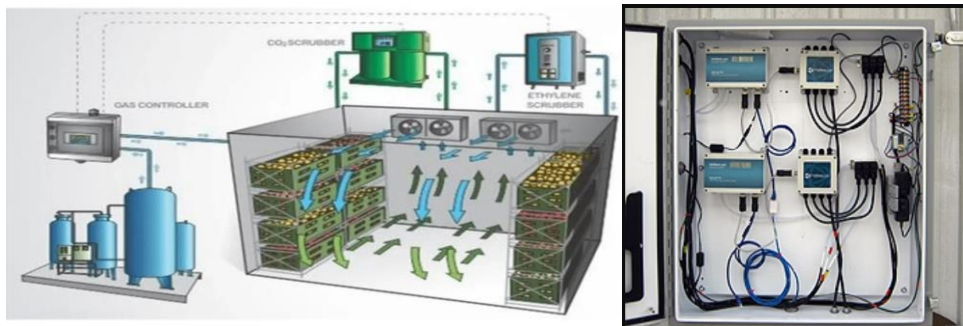


Рисунок 1.6 - Системи з контрольованою атмосферою

Окремим напрямком розвитку технологій зберігання овочів є системи з контрольованою атмосферою. У таких сховищах, крім температури та вологості, регулюється газовий склад повітря, зокрема концентрація кисню та вуглекислого газу.

Зменшення концентрації кисню та підвищення концентрації CO_2 дозволяє сповільнити процеси дихання рослинної продукції, що значно подовжує термін її зберігання. Для реалізації таких технологій використовуються газоаналізатори, системи подачі азоту або вуглекислого газу, а також герметичні камери з автоматичним регулюванням атмосфери.

Застосування систем контрольованої атмосфери широко використовується у великих аграрних підприємствах та логістичних центрах, де необхідно забезпечити тривале зберігання овочів і фруктів із мінімальними втратами якості.

1.3 Основні параметри контролю та постановка завдання для побудови схеми керування мікрокліматом овочесховища

Ефективність функціонування системи управління мікрокліматом овочесховища безпосередньо визначається точністю контролю технологічних параметрів, що впливають на фізіологічний стан продукції під час зберігання. Овочева продукція після закладання у сховище продовжує проходити процеси дихання, теплообміну та вологообміну, внаслідок чого внутрішнє середовище сховища постійно змінюється. Саме тому система автоматизованого керування

					ДП.АКІТ.10658691.00.00.000ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		16

повинна забезпечувати безперервне вимірювання та регулювання параметрів, що визначають стабільність умов зберігання.

Найважливішим параметром контролю є температура повітря у внутрішньому об'ємі овочесховища, оскільки саме вона визначає інтенсивність біохімічних процесів у продукції, швидкість дихання, випаровування вологи та розвиток мікрофлори. Для більшості видів овочів оптимальний температурний діапазон знаходиться в межах від 0 до +5 °С, однак конкретні значення визначаються видом продукції, тривалістю зберігання та технологічними вимогами. Контроль температури повинен здійснюватися не лише у повітряному середовищі, а й у різних шарах продукції, що дозволяє оцінювати теплову неоднорідність усередині масиву зберігання.

Другим ключовим параметром є відносна вологість повітря, яка безпосередньо впливає на інтенсивність втрати маси овочів унаслідок випаровування вологи. Недостатній рівень вологості призводить до усушки продукції, тоді як надмірна вологість створює умови для розвитку грибкових уражень і конденсації. У більшості технологій зберігання овочів необхідно підтримувати вологість на рівні 85–95 %, що вимагає високої точності вимірювання та регулювання.

Суттєвим параметром є концентрація вуглекислого газу, яка змінюється внаслідок дихання овочевої продукції. Підвищення концентрації CO₂ понад допустимі межі може призводити до порушення фізіологічного стану продукції, прискорення старіння або погіршення смакових властивостей. Тому система керування повинна враховувати газовий склад повітря та активувати вентиляційні режими при перевищенні встановлених порогових значень.

Важливим параметром технологічного контролю є швидкість і напрямок повітряного потоку, оскільки саме від організації вентиляції залежить рівномірність температурного поля у сховищі. Недостатній повітрообмін спричиняє локальні зони перегріву, тоді як надмірна інтенсивність вентиляції може викликати пересушування продукції. У зв'язку з цим система повинна забезпечувати регульовану роботу вентиляторів залежно від поточного стану середовища.

					ДП.АКІТ.10658691.00.00.000ПЗ	Арк.
						17
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		

Додатково контролюються перепад тиску в повітряних каналах, стан дверей, режими роботи холодильного обладнання, аварійні температурні відхилення та справність датчиків, оскільки ці параметри визначають функціональну надійність системи та безпеку технологічного процесу. Таблиця 1.1 відображає допустимі параметри мікроклімату овочесховища.

Таблиця 1.1 – Допустимі норми контрольованих параметрів мікроклімату овочесховища

Контрольований параметр	Позначення	Допустимий діапазон	Оптимальне значення	Допустиме відхилення	Технологічне значення
Температура повітря	T, °C	0...+5 °C	+2 °C	±1 °C	Забезпечує уповільнення біохімічних процесів у продукції
Відносна вологість повітря	φ, %	85...95 %	90 %	±3 %	Запобігає усушці продукції та втраті маси
Концентрація CO ₂	C(CO ₂), ppm	500...3000 ppm	до 1500 ppm	±200 ppm	Контроль газового складу атмосфери
Швидкість повітряного потоку	v, м/с	0,1...0,5 м/с	0,25 м/с	±0,05 м/с	Забезпечує рівномірний повітрообмін
Перепад тиску в каналах вентиляції	ΔP, Па	20...150 Па	60 Па	±10 Па	Контроль ефективності вентиляції
Температура продукції	T _p , °C	1...4 °C	+3 °C	±1 °C	Контроль теплового стану масиву продукції
Частота повітрообміну	n, раз/год	2...6	4	±1	Видалення надлишкового тепла і CO ₂
Температура зовнішнього повітря	T _{зовн} , °C	залежно від сезону	контрольована	—	Використовується для адаптивного керування

Постановка завдання побудови схеми керування мікрокліматом овочесховища полягає у створенні функціонально завершеної автоматизованої структури, здатної забезпечити безперервний моніторинг технологічних

параметрів, аналіз їх відхилень від заданих уставок і формування керуючих сигналів для виконавчих механізмів. У межах поставленого завдання необхідно визначити склад сенсорної підсистеми, вибрати мікропроцесорний блок керування, обґрунтувати спосіб підключення виконавчих пристроїв та реалізувати логіку взаємодії між елементами системи.

Проектована схема повинна забезпечувати керування вентиляційною установкою, холодильним агрегатом, нагрівальними елементами, зволожувачем або осушувачем повітря, а також передбачати реалізацію аварійного контролю й можливість інтеграції в мережеву систему диспетчеризації. Особлива увага приділяється формуванню замкненого контуру регулювання, у якому інформація від датчиків використовується для автоматичної корекції режимів роботи обладнання в режимі реального часу.

Таким чином, побудова схеми керування мікрокліматом овочесховища передбачає синтез багатопараметричної автоматизованої системи, орієнтованої на забезпечення стабільних умов зберігання продукції, зменшення втрат урожаю та підвищення енергоефективності функціонування об'єкта

					ДП.АКІТ.10658691.00.00.000ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		19

2 ПОБУДОВА СИСТЕМИ УПРАВЛІННЯ МІКРОКЛІМАТОМ ОВОЧЕСХОВИЩА

2.1. Компоненти системи управління мікрокліматом овочесховища

Мікропроцесорна система управління мікрокліматом овочесховища структурно формується як багаторівнева автоматизована система, що поєднує вимірювальні, обчислювальні та виконавчі підсистеми в єдиному контурі регулювання. Її архітектура передбачає наявність сенсорного рівня, призначеного для безперервного моніторингу фізичних параметрів внутрішнього середовища, обчислювального ядра, яке реалізує алгоритми аналізу та керування, а також силового та виконавчого рівнів, що забезпечують безпосередній вплив на технологічні процеси формування мікроклімату[2].

Вимірювальна підсистема включає первинні перетворювачі температури, відносної вологості повітря, концентрації вуглекислого газу та, за необхідності, швидкості повітряного потоку або диференціального тиску. Дані сенсори виконують функцію перетворення фізичних величин у електричні сигнали, придатні для подальшої обробки. З метою підвищення точності та завадостійкості система може містити аналогові фронт-енди, фільтри, підсилювачі та аналого-цифрові перетворювачі, які забезпечують нормалізацію сигналів і їх дискретизацію відповідно до вимог мікроконтролера. Просторове розміщення сенсорів визначається аеродинамічними та теплотехнічними особливостями приміщення овочесховища, що дозволяє отримувати репрезентативні дані про стан середовища.

Обчислювальний модуль системи реалізується на базі мікроконтролера або промислового мікропроцесорного контролера, який виконує функції збору даних, їх цифрової обробки, зберігання параметрів налаштування та формування керуючих сигналів. У програмному забезпеченні передбачаються алгоритми підтримання заданих температурно-вологісних режимів, що можуть базуватися на принципах пропорційно-інтегрально-диференціального регулювання або адаптивних методах керування. Обчислювальний блок також виконує логіку

					ДП.АКІТ.10658691.00.00.000ПЗ	Арк.
						20
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		

аварійного реагування, діагностики стану датчиків і виконавчих механізмів, а за потреби — функції журналювання та передавання даних до зовнішніх систем моніторингу[3].

Виконавча підсистема охоплює пристрої, що забезпечують зміну параметрів мікроклімату відповідно до сформованих керуючих впливів. До неї належать компресійні холодильні агрегати або системи повітряного охолодження, електричні або водяні нагрівальні елементи, зволожувачі чи осушувачі повітря, а також вентиляційні установки з регульованою продуктивністю. Керування цими пристроями здійснюється через силові модулі, що можуть включати релейні блоки, твердотільні реле або напівпровідникові перетворювачі частоти для плавного регулювання швидкості вентиляторів і компресорів. Силова частина системи передбачає електричну ізоляцію та захист від перевантажень, що забезпечує надійність експлуатації в умовах підвищеної вологості та температурних коливань[4].

Інтерфейсна складова системи реалізується у вигляді панелі оператора або вбудованого дисплея з елементами керування, що дозволяє встановлювати задані режими зберігання для різних видів овочевої продукції. Крім локального інтерфейсу, система може підтримувати мережеві інтерфейси зв'язку для інтеграції з віддаленими системами диспетчеризації або хмарними сервісами, що забезпечує централізований контроль і аналіз експлуатаційних даних.

Нижче подано добірку компонентів, які узгоджуються з побудованою раніше схемою мікропроцесорної системи керування мікрокліматом овочесховища. Для ілюстрації наведено репрезентативні зображення ключових вузлів: контролера, джерела живлення, датчика якості повітря та операторської панелі.

Як центральний елемент системи доцільно використати програмований логічний контролер Siemens LOGO! 8 12/24 RCE (рисунок 2.1). Цей контролер працює від 12/24 V DC, має 8 дискретних входів, з яких 4 можуть використовуватися як аналогові, 4 релейні виходи та вбудований Ethernet-інтерфейс. Таке поєднання характеристик робить його придатним для локального

					ДП.АКІТ.10658691.00.00.000ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		21

автоматичного керування вентиляцією, нагрівом, осушенням, сигналізацією та для подальшої інтеграції зі SCADA-рівнем.



Рисунок 2.1 - Логічний контролер Siemens LOGO! 8 12/24 RCE

У контексті запропонованої схеми саме цей пристрій може виконувати функції збору сигналів від датчиків, логічної обробки, формування команд на сухі контакти холодильного агрегату та взаємодії з HMI.

Для живлення контролера, датчиків і допоміжних кіл керування доцільно застосувати джерело Mean Well HDR-60-24 (рисунок 2.2) або промисловий аналог класу 24 V DC. Серія HDR-60 є DIN-рейковою, має номінальну потужність 60 W, монтаж на стандартну рейку TS-35 і робочий температурний діапазон до +70 °C за умов відповідного дерейтингу.



Рисунок 2.2 - Джерело живлення контроллера Mean Well HDR-60-24

					ДП.АКІТ.10658691.00.00.000ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		22

Для нашої системи таке джерело виконує базову функцію формування стабілізованої шини 24 V DC, від якої живляться контролер, проміжні реле, датчики та інтерфейсні модулі. Це відповідає промисловій практиці побудови шаф керування для об'єктів мікроклімату.

Для вимірювання температури та відносної вологості повітря в шафі або контрольованій зоні доцільно використати Siemens QFA3171. Цей сенсорний перетворювач формує уніфіковані вихідні сигнали 4...20 mA як для вологості, так і для температури, що добре узгоджується з раніше прийнятою структурою аналогових входів PLC. Роль такого датчика в системі полягає у формуванні основного інформаційного каналу регулювання температурно-вологісного режиму, на основі якого контролер приймає рішення про вмикання вентиляції, нагрівача, зволожувача або осушувача. Використання струмових сигналів додатково підвищує завадостійкість при роботі у виробничому середовищі.

Для контролю концентрації вуглекислого газу доцільно застосувати Siemens QPA2002 або, якщо потрібне суміщене вимірювання, Siemens QPA2062 (рисунок 2.3). Модель QPA2002 підтримує аналогові виходи 0...5 V, 0...10 V або 4...20 mA та працює в діапазоні живлення AC 24 V або DC 15...35 V, а QPA2062 додатково вимірює температуру й відносну вологість.



Рисунок 2.3 - Siemens QPA2062

					ДП.АКІТ.10658691.00.00.000ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		23

У нашій системі такий датчик забезпечує формування каналу контролю газового складу повітря. Це дає змогу реалізувати demand-controlled ventilation, тобто керувати провітрюванням не лише за температурою, а й за фактичною інтенсивністю дихання продукції та накопиченням CO₂ у сховищі.

Для контролю стану повітряних каналів і роботи вентиляційної підсистеми доцільно використати Siemens QBM3020-1D(рисунок 2.4) або інший диференціальний датчик тиску серії QBM. Для цієї серії Siemens вказує виконання для повітря та неагресивних газів; модель QBM3020-1D має діапазон 0...100 Pa і орієнтована на задачі з підвищеними вимогами до точності.



Рисунок 2.4 - Диференціальний датчик Siemens QBM3020-1D

У схемі мікроклімату такий елемент виконує функцію непрямого контролю роботи вентиляторів, стану фільтрів і повітропроводів, а також може використовуватись у логіці аварійного виявлення недостатнього повітрообміну.

					ДП.АКІТ.10658691.00.00.000ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		24

Як комутаційний елемент силових кіл вентилятора або допоміжних механізмів доцільно застосувати контактор Schneider Electric TeSys D LC1D09(рисунок 2.5) у поєднанні з тепловим реле відповідного типорозміру. Для LC1D09 Schneider вказує виконання 3Р, категорію AC-3 до 9 А, а для реле серії LRD зазначається сумісність з контакторами LC1D09/LC1D12. У межах нашої схеми цей вузол виконує подвійну функцію: забезпечує електричне розділення силового навантаження від низьковольтного PLC і водночас реалізує захист електродвигуна вентилятора від перевантаження.



Рисунок 2.5 - Контактор Schneider Electric TeSys D LC1D09

Якщо холодильний агрегат має власну автоматику, контролер може подавати на нього лише команду дозволу через сухий контакт, не втручаючись у силову частину компресора.

Для локальної взаємодії оператора з установкою доцільно використати Siemens SIMATIC HMI KTP700 Basic. Для цієї панелі Siemens зазначає 7-дюймовий TFT-екран, клавішно-сенсорне керування та інтерфейс PROFINET. У нашій архітектурі така панель виконує функції введення уставок, відображення поточних параметрів мікроклімату, сигналізації аварійних станів і ручного вибору

					ДП.АКІТ.10658691.00.00.000ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		25

режимів роботи. Включення HMI в систему підвищує ергономічність експлуатації та спрощує прив'язку локального контролера до верхнього SCADA-рівня.

Якщо потрібен більш компактний прототип або дослідний зразок, замість промислового CO₂-перетворювача можна використати Sensirion SCD30 (рисунок 2.6).



Рисунок 2.6 - Модуль Sensirion SCD30 для вимірювання CO₂, температури та вологості

Цей модуль поєднує вимірювання CO₂, температури та вологості; виробник вказує цифрові інтерфейси UART або I²C, а також типову точність CO₂ на рівні $\pm(30 \text{ ppm} + 3\% \text{ MV})$. У такому випадку він більше підходить для лабораторного макета, наукового стенда або дослідної установки, ніж для безпосереднього промислового впровадження в шафу керування без додаткового інтерфейсного узгодження.

Отже, для побудованої системи керування мікрокліматом овочесховища можна обґрунтовано прийняти таку компонентну основу: PLC класу Siemens LOGO! 8 як центральний вузол керування, DIN-рейкове джерело 24 V DC для живлення, промислові перетворювачі температури, вологості, CO₂ та перепаду тиску як інформаційну підсистему, контактори й теплові реле як силову комутацію, а HMI-панель як локальний інтерфейс оператора. Такий набір

					ДП.АКІТ.10658691.00.00.000ПЗ	Арк.
						26
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		

компонентів є технічно узгодженим із раніше розробленими принциповою схемою та SCADA-архітектурою і може бути використаний як основа для розділу «Обґрунтування вибору апаратних компонентів системи».

2.2. Побудова автоматизованої системи контролю

На запропонованій принциповій електричній схемі (рисунок 2.7) реалізовано мікропроцесорну систему керування мікрокліматом овочесховища з розділенням силової та керуючої частин і застосуванням керування виконавчими механізмами через сухі контакти. Архітектура побудована відповідно до вимог електромагнітної сумісності, електробезпеки та надійності функціонування в умовах підвищеної вологості та температурних коливань.

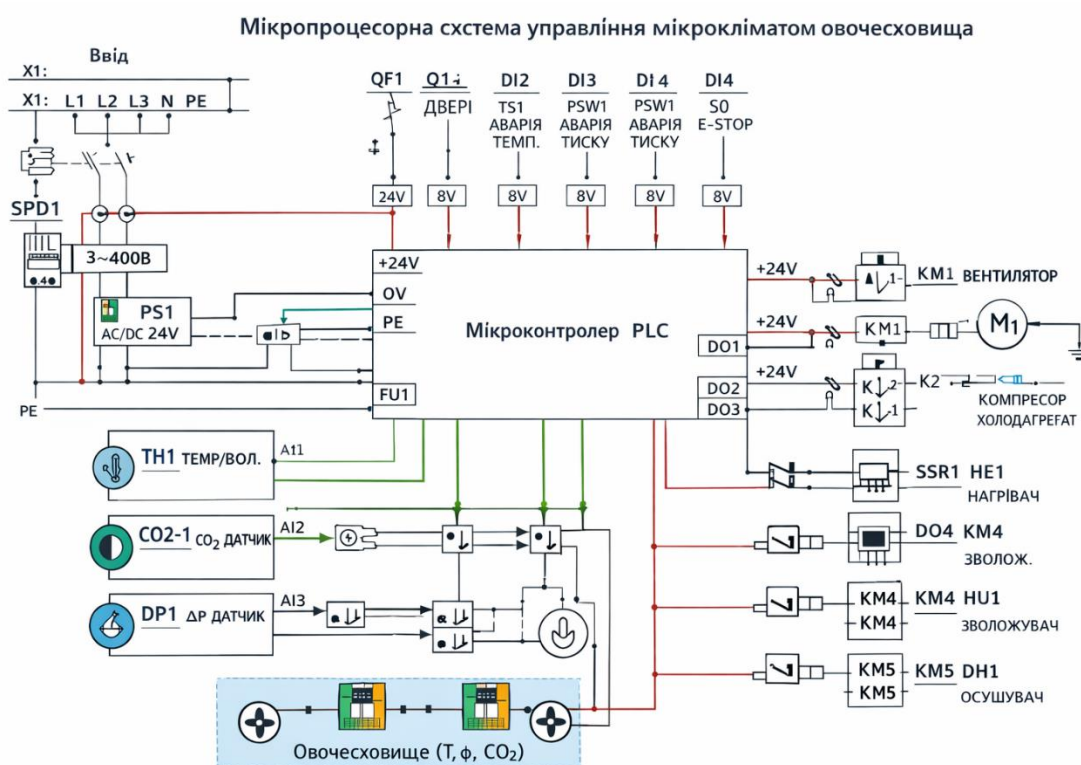


Рисунок 2.7 – Мікропроцесорна система управління мікрокліматом овочесховища

Ввідна частина системи представлена клемним блоком підключення мережі змінного струму з фазними провідниками, нейтраллю та захисним заземленням.

					ДП.АКІТ.10658691.00.00.000ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		27

Для захисту від перевантажень і коротких замикань застосовано автоматичний вимикач, який забезпечує селективне відключення живлення у разі аварійних режимів. Обмежувач імпульсних перенапруг виконує функцію захисту електронних компонентів від грозових та комутаційних перенапруг, що особливо актуально для об'єктів аграрної інфраструктури з протяжними кабельними лініями. Формування стабілізованої напруги постійного струму здійснюється імпульсним джерелом живлення типу AC/DC з вихідною напругою 24 В, що є типовим стандартом для промислових систем автоматизації.

Центральним елементом схеми є мікроконтролер або програмований логічний контролер, який реалізує алгоритми збору, обробки та аналізу даних, а також формування керуючих сигналів. Його апаратна частина містить входи для дискретних та аналогових сигналів, що дозволяє інтегрувати як контактні датчики стану, так і вимірювальні перетворювачі з уніфікованими струмовими або напруговими виходами. Дискретні входи використовуються для підключення кінцевих вимикачів дверей, аварійних термостатів, пресостатів та кнопки аварійної зупинки, що формують логічні сигнали безпеки. Аналогові входи приймають сигнали від комбінованого датчика температури та відносної вологості, датчика концентрації вуглекислого газу та датчика перепаду тиску, забезпечуючи кількісний контроль параметрів повітряного середовища. Передбачена нормалізація сигналів відповідно до стандартів 4–20 мА або 0–10 В, що підвищує завадостійкість і точність вимірювання.

Виконавча частина системи побудована на основі релейних та твердотільних комутаційних елементів, які забезпечують гальванічну розв'язку між низьковольтними ланцюгами керування та силовими колами навантаження. Для керування вентиляторами застосовується контактор з тепловим захистом електродвигуна, що гарантує надійну експлуатацію в тривалому режимі роботи. Компресор холодильного агрегату підключений через сухий контакт, що дозволяє передавати лише команду дозволу або заборони роботи без прямої комутації силового струму контролером, підвищуючи електробезпеку та сумісність з заводською автоматикою холодильного обладнання. Нагрівальний елемент комутується через твердотільне реле, що забезпечує безшумність роботи та

					ДП.АКІТ.10658691.00.00.000ПЗ	Арк.
						28
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		

зменшення електромеханічного зносу. Зволожувач і осушувач підключені через окремі контактори або релейні модулі, що дозволяє реалізувати незалежне регулювання вологості залежно від поточного стану середовища.

У схемі також передбачені елементи індикації та сигналізації, які забезпечують візуальний контроль наявності живлення та аварійних режимів. Захисне заземлення корпусів обладнання та екранування сигнальних ліній формують систему електробезпеки та електромагнітної сумісності, що є критично важливим для стабільної роботи мікропроцесорної частини. Сукупність зазначених елементів утворює функціонально завершену систему автоматизованого керування, здатну підтримувати нормативні параметри мікроклімату овочесховища з урахуванням технологічних вимог зберігання продукції та забезпечення енергоефективності процесу.

2.3. Побудова архітектури SCADA для керування овочесховищем

Запропонована SCADA-архітектура системи управління мікрокліматом овочесховища (рисунок 2.8) побудована за ієрархічним принципом із розмежуванням польового, контролерного та диспетчерського рівнів, що забезпечує масштабованість, відмовостійкість і можливість централізованого моніторингу технологічних параметрів. Основу структури становить розподілена мережа локальних шаф керування, кожна з яких обслуговує окреме овочесховище або функціональний сегмент технологічного комплексу.

На нижньому рівні розташовані вимірювальні та виконавчі пристрої, що безпосередньо взаємодіють з об'єктом керування. Датчики температури, відносної вологості, концентрації вуглекислого газу та перепаду тиску формують аналогові або цифрові сигнали, які надходять до локальних контролерів через інтерфейси вводу-виводу. Виконавчі механізми, включаючи вентилятори, компресори, нагрівальні елементи, зволожувачі та осушувачі, керуються через дискретні або аналогові канали, а також через стандартні промислові протоколи. Обмін даними між контролерами та периферійними модулями може реалізовуватися за допомогою інтерфейсу RS-485 із використанням протоколу

					ДП.АКІТ.10658691.00.00.000ПЗ	Арк.
						29
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		

Modbus RTU, що забезпечує стійкість до завад і можливість організації багатоточкової шини.

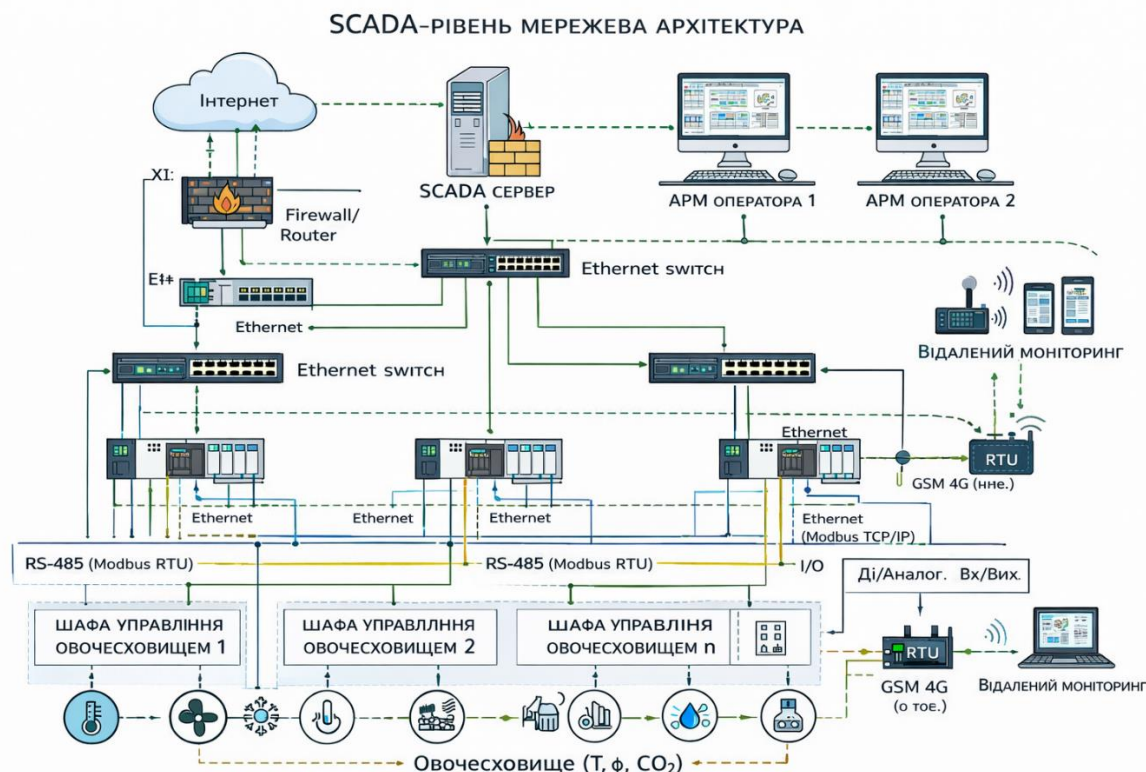


Рисунок 2.8 - Схема SCADA для керування овочесховищем

Контролерний рівень представлений програмованими логічними контролерами, інтегрованими в шафи керування. Вони виконують функції локального регулювання, реалізуючи алгоритми підтримання заданих параметрів мікроклімату, а також здійснюють первинну обробку та агрегацію даних. Контролери підключені до промислової мережі Ethernet через комутатори, що формують локальний сегмент об'єкта. Для обміну з вищим рівнем використовується протокол Modbus TCP/IP або інші стандартні мережеві протоколи, що забезпечують уніфікований доступ до технологічних змінних.

Диспетчерський рівень складається зі SCADA-сервера, який виконує функції централізованого збору даних, архівації, візуалізації та формування звітності. Сервер підключений до операторських автоматизованих робочих місць через внутрішню мережу підприємства. Інформаційна взаємодія відбувається за клієнт-серверною моделлю, що дозволяє декільком операторам одночасно

					ДП.АКІТ.10658691.00.00.000ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		30

здійснювати моніторинг і керування об'єктами. У системі передбачено мережевий екран або маршрутизатор із функціями фаєрволу, який забезпечує сегментацію мережі та захист від несанкціонованого доступу з боку зовнішніх мереж.

Для реалізації віддаленого моніторингу застосовується телеметричний модуль або RTU із підтримкою мобільного зв'язку стандарту GSM/4G, що забезпечує передачу технологічних параметрів до центрального сервера або хмарного сервісу. Такий підхід дозволяє здійснювати контроль стану овочесховищ незалежно від фізичного розташування об'єкта, а також організувати систему сповіщень про аварійні події. При цьому мережевий трафік проходить через захищені канали зв'язку, що відповідає вимогам кібербезпеки промислових систем.

Таким чином, архітектура SCADA-рівня формує інтегроване інформаційно-керуюче середовище, у якому локальні системи автоматизації об'єднані в єдину мережеву структуру з централізованим управлінням і віддаленим доступом. Така побудова забезпечує підвищення надійності функціонування, оперативність прийняття рішень та можливість подальшого розширення системи без суттєвої реконфігурації базової інфраструктури.

					ДП.АКІТ.10658691.00.00.000ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		31

3. РЕАЛІЗАЦІЯ ТА ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЕКТОВАНОЇ СИСТЕМИ

3.1 Модель об'єкту регулювання

Згідно з положеннями класичної теорії автоматичного управління, овочесховище як об'єкт регулювання розглядається як багатозв'язна динамічна система з розподіленими параметрами, у якій зміна стану внутрішнього середовища відбувається під впливом зовнішніх збурень, внутрішніх тепло- і вологообмінних процесів, а також керуючих впливів з боку технічних засобів автоматизації. Основною особливістю такого об'єкта є наявність значної теплової інерційності, обумовленої великим внутрішнім об'ємом приміщення, теплоємністю огорожувальних конструкцій, повітряного середовища та масиву продукції, що зберігається.

У межах класичної постановки задачі автоматичного керування овочесховище доцільно розглядати як об'єкт із декількома взаємопов'язаними каналами регулювання, серед яких основним є температурний канал, а додатковими — канали вологості, газового складу повітря та вентиляційного повітрообміну. При цьому вихідною координатою об'єкта в температурному каналі виступає температура повітря у внутрішньому об'ємі сховища, яка позначається як $T(t)$, а керуючим впливом є потужність охолодження, нагріву або інтенсивність вентиляції, що формується системою автоматичного регулювання.

З позицій ТАУ температурний канал овочесховища може бути апроксимований інерційною ланкою першого порядку із запізненням, оскільки реакція внутрішнього середовища на зміну керуючого впливу має плавний характер і супроводжується часовою затримкою. Такий тип моделі широко використовується для опису теплових об'єктів великої місткості. Передавальна функція об'єкта в загальному вигляді може бути представлена як:

$$W(s) = \frac{K}{Ts + 1} e^{-\tau s}$$

					ДП.АКІТ.10658691.00.00.000ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		32

де K — коефіцієнт передачі об'єкта, що характеризує зміну температури при зміні керуючого впливу, T — стала часу теплового процесу, яка відображає інерційність системи, τ — транспортне або теплове запізнення, обумовлене тривалістю розповсюдження теплового впливу у внутрішньому об'ємі сховища.

Коефіцієнт передачі об'єкта визначається співвідношенням між зміною потужності холодильного або нагрівального обладнання та відповідною зміною температури повітря в робочій зоні сховища. Стала часу, як правило, має значні значення через високу теплоємність продукції, що зберігається, та повітряного середовища. Наявність запізнення пов'язана з тим, що після ввімкнення холодильного агрегату або вентиляційної системи температура змінюється не миттєво, а через певний інтервал часу, необхідний для теплопередачі.

На об'єкт управління діють збурюючі впливи, до яких належать температура зовнішнього повітря, сонячне нагрівання конструкцій, відкривання дверей, зміна маси продукції, інтенсивність дихання овочів та зміна вологості зовнішнього середовища. У термінах ТАУ ці збурення позначаються як $f(t)$ і впливають на вихідну координату незалежно від керуючого сигналу. Особливістю овочесховища є те, що значна частина збурень має випадковий характер, що потребує побудови системи з достатнім запасом стійкості.

У каналі регулювання вологості об'єкт також характеризується інерційністю, однак динаміка зміни відносної вологості має тісний зв'язок із температурним режимом, оскільки зміна температури безпосередньо впливає на вологовміст повітря. Тому в практичних системах керування виникає багатозв'язність, коли зміна одного параметра викликає перехресний вплив на інші координати системи.

Структурно об'єкт управління овочесховища в класичній теорії автоматичного регулювання можна представити як послідовне поєднання регулюючого органа, виконавчого механізму, інерційного теплового об'єкта та вимірювального каналу з негативним зворотним зв'язком. У такій системі датчик температури формує сигнал зворотного зв'язку, регулятор порівнює його з уставкою, після чого формується керуючий сигнал на холодильне обладнання, вентиляцію або нагрів.

					ДП.АКІТ.10658691.00.00.000ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		33

Таким чином, з точки зору класичної теорії автоматичного управління овочесховище є інерційним об'єктом із запізненням, багатоканальними зв'язками та суттєвими зовнішніми збуреннями, що обґрунтовує доцільність використання замкнених систем автоматичного регулювання з мікропроцесорним керуванням, здатних забезпечувати стабільність технологічних параметрів у широкому діапазоні експлуатаційних умов

3.2 Побудова моделі САР температури овочесховища

У межах класичної теорії автоматичного управління систему керування мікрокліматом овочесховища доцільно розглядати як замкнену систему автоматичного регулювання температури, у якій регульованою величиною є температура повітря у внутрішньому об'ємі сховища. Основне завдання такої системи полягає у підтриманні температури на заданому рівні незалежно від змін зовнішніх умов, тепловиділення продукції та інших збурюючих впливів.

До складу функціональної структури САР системи входять задавальний пристрій, регулятор, виконавчий механізм, регулюючий орган, об'єкт керування та вимірювальний елемент з від'ємним зворотним зв'язком. У цій структурі задавальний сигнал $T_{\text{зад}}(t)$ порівнюється з поточним значенням температури $T(t)$, після чого формується похибка регулювання

$$e(t) = T_{\text{зад}}(t) - T(t).$$

Ця похибка надходить на регулятор, який формує керуючий вплив $u(t)$ на виконавчий механізм системи охолодження, нагріву або вентиляції.

Ця система є замкненою одноконтурною САР із від'ємним зворотним зв'язком. Основним каналом регулювання є температурний канал.

Структурну схему САР можна подати так, як показано на рисунку 3.1.

					ДП.АКІТ.10658691.00.00.000ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		34

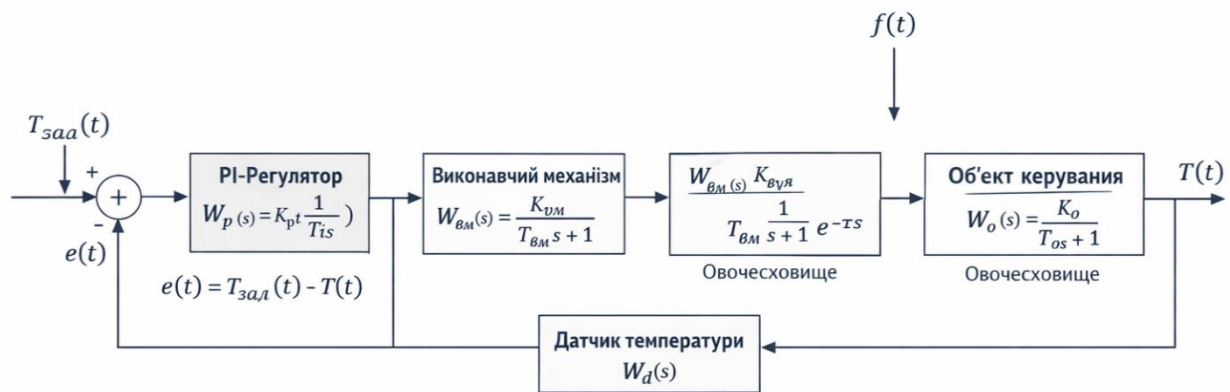


Рисунок 3.1 - Структурна схему САР

Для теплових об'єктів, до яких належить овочесховище, найчастіше застосовують ПІ-регулятор, оскільки він забезпечує усунення статичної похибки та достатню якість перехідного процесу. Його передавальна функція має вигляд

$$W_p(s) = K_p \left(1 + \frac{1}{T_i s} \right),$$

де K_p — коефіцієнт пропорційного підсилення, T_i — стала інтегрування.

У разі необхідності покращення швидкодії може застосовуватись ПІД-регулятор:

$$W_p(s) = K_p \left(1 + \frac{1}{T_i s} + T_d s \right),$$

де T_d — стала диференціювання.

Для овочесховища доцільніше приймати саме ПІ-регулятор, оскільки об'єкт є інерційним, а диференціальна складова може надмірно підсилювати шум вимірювання.

Виконавчий механізм, що реалізує керування холодильним агрегатом, заслінкою або вентилятором, можна апроксимувати аперіодичною ланкою першого порядку:

$$W_{\text{вм}}(s) = \frac{K_{\text{вм}}}{T_{\text{вм}} s + 1},$$

де $K_{\text{вм}}$ — коефіцієнт передачі виконавчого механізму, $T_{\text{вм}}$ — його стала часу.

					ДП.АКІТ.10658691.00.00.000ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		35

Оскільки електромеханічні приводи зазвичай мають значно меншу інерційність порівняно з тепловим об'єктом, значення $T_{\text{вм}}$ є відносно малим.

Овочесховище як тепловий об'єкт доцільно апроксимувати інерційною ланкою першого порядку із запізненням:

$$W_0(s) = \frac{K_0}{T_0 s + 1} e^{-\tau s}$$

де K_0 — коефіцієнт передачі об'єкта,

T_0 — стала часу об'єкта,

τ — час запізнення.

Така модель є типовою для систем теплового регулювання, оскільки зміна температури в сховищі відбувається поступово і з часовою затримкою. Велика стала часу пояснюється значним об'ємом приміщення, теплоємністю повітря, конструкцій і продукції.

Вимірювальний перетворювач температури також можна подати аперіодичною ланкою першого порядку:

$$W_d(s) = \frac{K_d}{T_d s + 1},$$

де K_d — коефіцієнт передачі датчика,

T_d — стала часу датчика.

У багатьох випадках, якщо інерційність датчика мала, можна приймати

$$W_d(s) \approx K_d.$$

Передавальна функція розімкненого контуру визначається добутком передавальних функцій усіх послідовно з'єднаних ланок:

$$W_{\text{рз}}(s) = W_p(s) \cdot W_{\text{вм}}(s) \cdot W_0(s) \cdot W_d(s).$$

Для ПІ-регулятора вона набуває вигляду

$$W_{\text{рз}}(s) = K_p \left(1 + \frac{1}{T_i s}\right) \cdot \frac{K_{\text{вм}}}{T_{\text{вм}} s + 1} \cdot \frac{K_0}{T_0 s + 1} e^{-\tau s} \cdot \frac{K_d}{T_d s + 1}.$$

Передавальна функція замкненої системи з від'ємним зворотним зв'язком визначається виразом

					ДП.АКІТ.10658691.00.00.000ПЗ	Арк.
						36
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		

$$W_{pз}(s) = \frac{W_p(s) \cdot W_{BM}(s) \cdot W_o(s)}{1 + W_p(s) \cdot W_{BM}(s) W_o(s)}$$

Якщо прийняти $W_d(s) = 1$, то

$$W_3(s) = \frac{W_p(s) \cdot W_{BM}(s) \cdot W_o(s)}{1 + W_p(s) \cdot W_{BM}(s) W_o(s)}$$

Часто використовують спрощену модель без урахування малої інерційності датчика:

$$W_{об}(s) = \frac{K}{(T_1s + 1)(T_2s + 1)} e^{-\tau s},$$

де

$$T_1 = T_{BM},$$

$$T_2 = T_0,$$

$$K = K_{BM} K_0.$$

Тоді розімкнена система з ПІ-регулятором описується як

$$W_{pз}(s) = K_p \left(1 + \frac{1}{T_i s}\right) \frac{K}{(T_1s + 1)(T_2s + 1)} e^{-\tau s},$$

Якщо запізнення на першому етапі не враховувати, то отримаємо раціональну передавальну функцію:

$$W_{pз}(s) = K_p \left(1 + \frac{1}{T_i s}\right) \frac{K}{(T_1s + 1)(T_2s + 1)}.$$

Для об'єкта першого порядку без запізнення рівняння теплового балансу може бути записане як

$$T_o \frac{dT(t)}{dt} + T(t) = K_o u(t) + f(t).$$

де $f(t)$ — збурюючий вплив, який враховує зміну температури зовнішнього середовища, тепловиділення продукції та інші фактори.

Це рівняння показує, що температура всередині овочесховища змінюється не миттєво, а з певною швидкістю, що визначається тепловою інерційністю системи.

					ДП.АКІТ.10658691.00.00.000ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		37

Для об'єкта типу «інерційна ланка із запізненням» доцільно використовувати ПІ-регулятор, оскільки:

- температурний об'єкт має велику інерційність;
- потрібно усунути статичну похибку;
- система не вимагає надмірно високої швидкодії;
- ПІ-закон є простим для реалізації в мікропроцесорному контролері.
- ПІД-регулятор може бути застосований у випадку більш жорстких

вимог до швидкодії, однак для овочесховища це не завжди виправдано.

Оскільки система є замкненою та містить інерційний об'єкт із запізненням, при надмірному підвищенні коефіцієнта підсилення регулятора можливе виникнення коливань. Тому під час синтезу регулятора потрібно забезпечити компроміс між швидкістю та запасом стійкості.

Для дослідження стійкості можуть бути використані:

- критерій Гурвіца — для систем без запізнення;
- частотні критерії Найквіста або Боде — для систем із запізненням;
- аналіз перехідної характеристики — для оцінювання якості

регулювання.

Для подальших розрахунків можна прийняти таку узагальнену модель:

$$W_0(s) = \frac{K_0}{T_0 s + 1} e^{-\tau s},$$

$$W_p(s) = K_p \left(1 + \frac{1}{T_i s}\right),$$

$$W_{\text{BM}}(s) = \frac{K_{\text{BM}}}{T_{\text{BM}} s + 1},$$

$$W_d(s) \approx 1.$$

Тоді передавальна функція розімкненої системи:

$$W_{\text{pz}}(s) = K_p \left(1 + \frac{1}{T_i s}\right) \cdot \frac{K_{\text{BM}}}{T_{\text{BM}} s + 1} \cdot \frac{K_0}{T_0 s + 1} e^{-\tau s}.$$

а замкненої системи:

					ДП.АКІТ.10658691.00.00.000ПЗ	Арк.
						38
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		

$$W_3(s) = \frac{K_p(1 + \frac{1}{T_i s}) \cdot \frac{K_{\text{ВМ}}}{T_{\text{ВМ}} s + 1} \cdot \frac{K_0}{T_0 s + 1} e^{-\tau s}}{1 + K_p(1 + \frac{1}{T_i s}) \cdot \frac{K_{\text{ВМ}}}{T_{\text{ВМ}} s + 1} \cdot \frac{K_0}{T_0 s + 1} e^{-\tau s}}.$$

Отже, система автоматичного регулювання температури овочесховища є замкненою одноконтурною САР із від'ємним зворотним зв'язком, у якій об'єкт управління описується як інерційна теплова ланка із запізненням. Така модель адекватно відображає фізичну природу процесу теплообміну в овочесховищі та може бути використана для подальшого синтезу регулятора, аналізу стійкості та дослідження якості перехідних процесів.

3.3 Дослідження стійкості САР температури овочесховища

У дослідженні прийнято, що канал регулювання температури описується як замкнена система автоматичного регулювання з ПІ-регулятором, виконавчим механізмом, тепловим об'єктом та від'ємним зворотним зв'язком. Оскільки овочесховище є тепловим об'єктом з вираженою інерційністю та транспортним запізненням, для аналізу було використано типову модель об'єкта у вигляді інерційної ланки першого порядку із запізненням. Для практичного дослідження стійкості запізнення апроксимовано методом Паде першого порядку, що дозволяє перейти до раціональної передавальної функції та виконати частотний і часовий аналіз.

Для ілюстративного розрахунку прийнято такі параметри: $K_p=1,8$, $T_i=40$ хв, $K_{\text{ВМ}}=1$, $T_{\text{ВМ}}=5$ хв, $T_{\text{ВМ}}=1,2$, $T_0=60$ хв, $\tau=8$ хв. Такі значення відповідають інерційному тепловому об'єкту середньої повільності та можуть бути використані як інженерна апроксимація для овочесховища.

За результатами аналізу полюси замкненої системи мають від'ємні дійсні частини, що свідчить про асимптотичну стійкість системи. Чисельно отримано такі корені характеристичного рівняння:

$$s_1=-0,338, s_{2,3}=-0,044 \pm j0,037, s_4=-0,040.$$

					ДП.АКІТ.10658691.00.00.000ПЗ	Арк.
						39
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		

Оскільки всі корені розміщені в лівій півплощині комплексної площини, замкнена система є стійкою.

Перехідна характеристика показує, що система виходить на усталене значення без розбігання, а статична похибка практично відсутня, що відповідає властивостям ПІ-регулятора. Максимальне перерегулювання становить приблизно 16 %, а час встановлення за критерієм 5 % дорівнює близько 111 хв. Це свідчить про помірно коливальний, але стійкий характер перехідного процесу, що є допустимим для повільних теплових об'єктів.

Частотний аналіз розімкненої системи показав, що частота зрізу становить приблизно 0,0387 рад/хв, а запас стійкості за фазою дорівнює близько 51,9°. Такий запас стійкості можна вважати достатнім для надійної роботи системи в умовах наявності збурень та параметричної невизначеності об'єкта. Амплітудно-фазова характеристика також не охоплює критичну точку $(-1;j0)$, що додатково підтверджує стійкість системи за критерієм Найквіста.

Отже, виконане дослідження показало, що синтезована САР температури овочесховища є стійкою та забезпечує відпрацювання задавального впливу без статичної похибки. Разом з тим наявність перерегулювання і відносно великого часу встановлення вказує на доцільність подальшого уточнення параметрів ПІ-регулятора з метою підвищення якості регулювання. У практичній реалізації це може бути досягнуто зменшенням коефіцієнта підсилення, корекцією сталої інтегрування або використанням більш точного налаштування на основі експериментальної ідентифікації об'єкта.

Перехідна характеристика відображає реакцію замкненої системи автоматичного регулювання на одиничний ступінчастий вплив, що відповідає зміні заданої температури у сховищі. Із графіка видно, що після подачі задавального сигналу температура змінюється плавно, без розбігання, що свідчить про стійкий характер системи. На початковій ділянці спостерігається прискорене наростання вихідної координати, після чого система переходить у режим коливального затухання.

					ДП.АКІТ.10658691.00.00.000ПЗ	Арк.
						40
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		

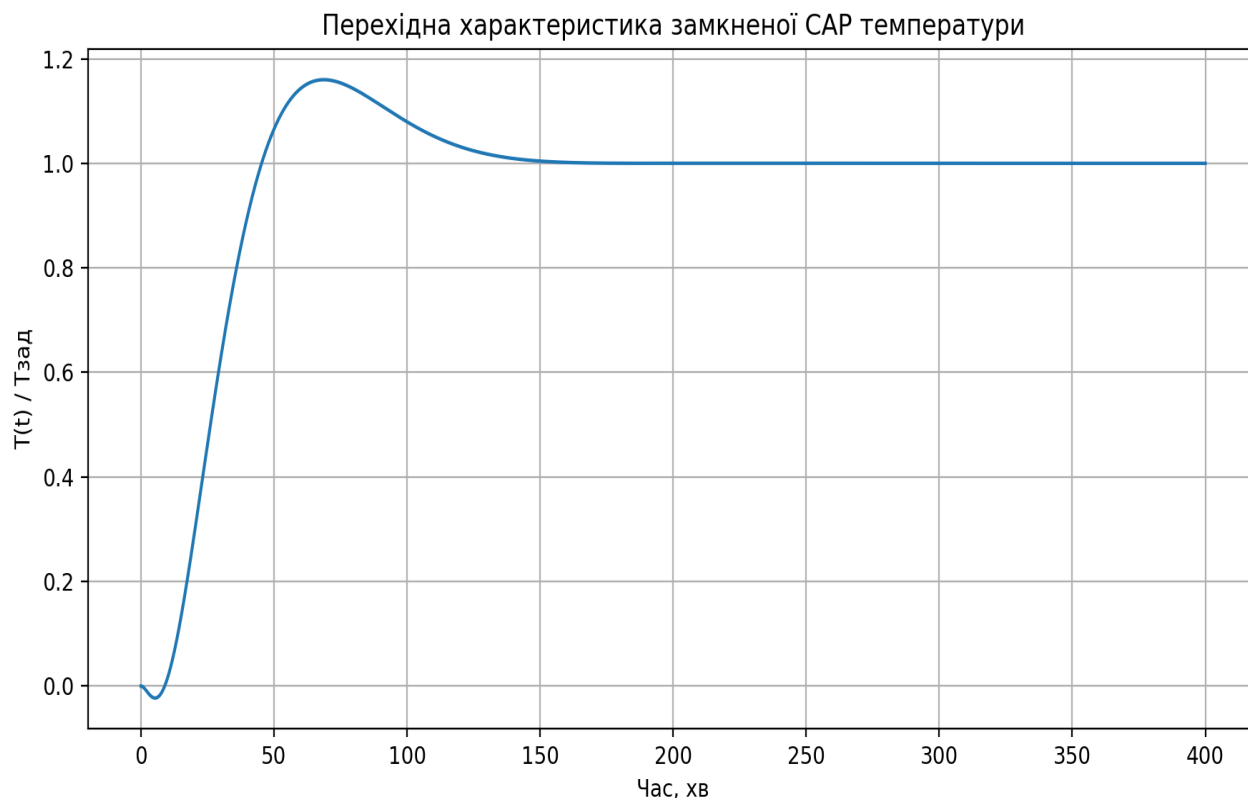


Рисунок 3.2 - Перехідна характеристика САР

Характерною особливістю перехідного процесу є наявність помірного перерегулювання, яке становить близько 16 %. Це пояснюється інтегральною складовою ПІ-регулятора, що забезпечує ліквідацію статичної похибки, але водночас викликає певне перевищення усталеного значення. Час встановлення системи до меж $\pm 5\%$ від усталеного значення становить приблизно 111 хвилин, що є допустимим для теплових технологічних об'єктів із великою інерційністю, до яких належить овочесховище.

Таким чином, перехідна характеристика підтверджує, що система забезпечує досягнення заданої температури без статичної похибки та без нестійких коливань.

Логарифмічна амплітудно-частотна характеристика показує залежність коефіцієнта підсилення розімкненої системи від частоти в логарифмічному масштабі. На низьких частотах спостерігається високий рівень підсилення, що є типовим для систем із інтегральною складовою регулювання і забезпечує високу точність у сталому режимі.

					ДП.АКІТ.10658691.00.00.000ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		41

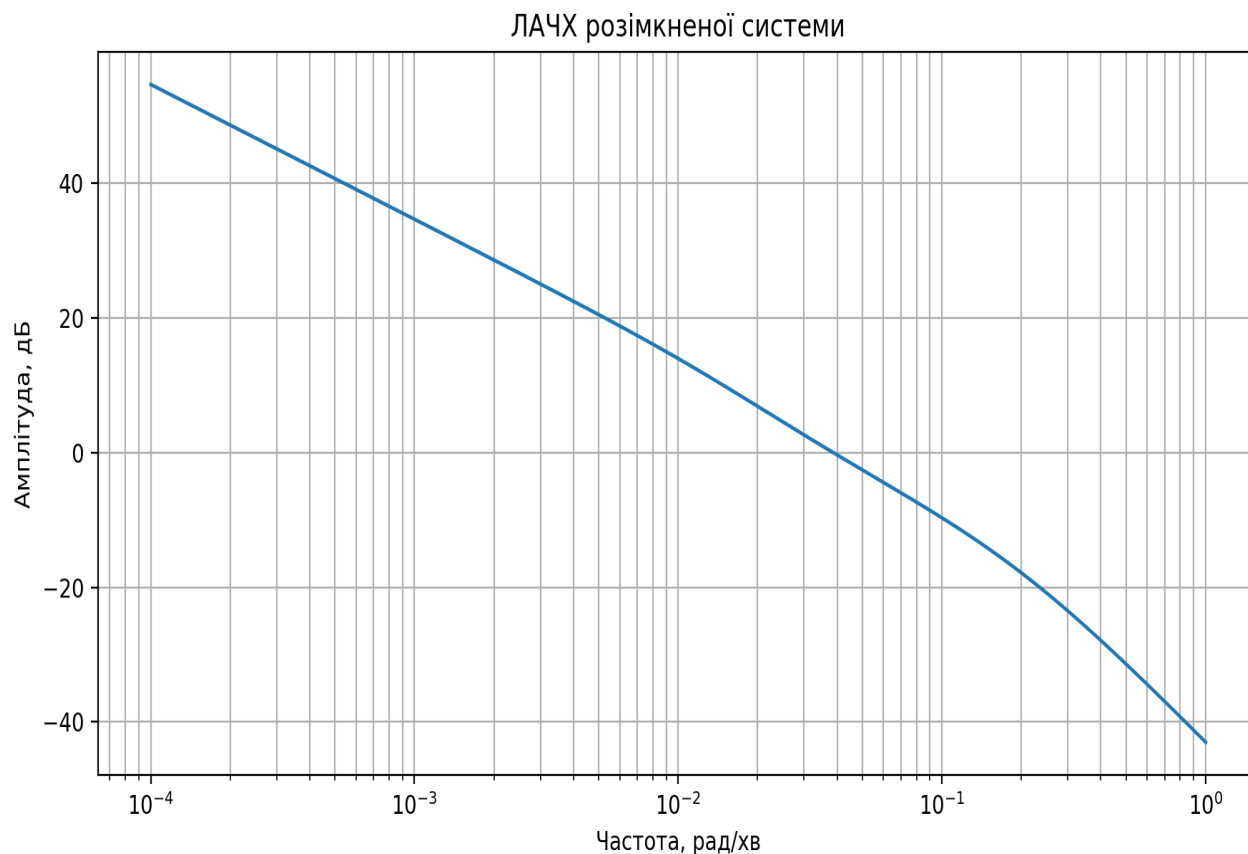


Рисунок 3.3 - Логарифмічна амплітудно-частотна характеристика САР

Із зростанням частоти амплітуда поступово зменшується, що свідчить про наявність інерційних властивостей об'єкта управління та виконавчого механізму. Перетин характеристики з рівнем 0 дБ відбувається приблизно на частоті 0,0387 рад/хв, що відповідає частоті зрізу системи. Саме ця частота визначає швидкодію системи та її запас стійкості.

Форма ЛАЧХ підтверджує, що система має типову поведінку теплового об'єкта з домінуванням низькочастотної складової.

Логарифмічна фазочастотна характеристика характеризує зміну фазового зсуву між вхідним і вихідним сигналами залежно від частоти. У низькочастотній області фазовий зсув є незначним, однак зі збільшенням частоти він зростає за модулем через інерційність об'єкта та вплив транспортного запізнення.

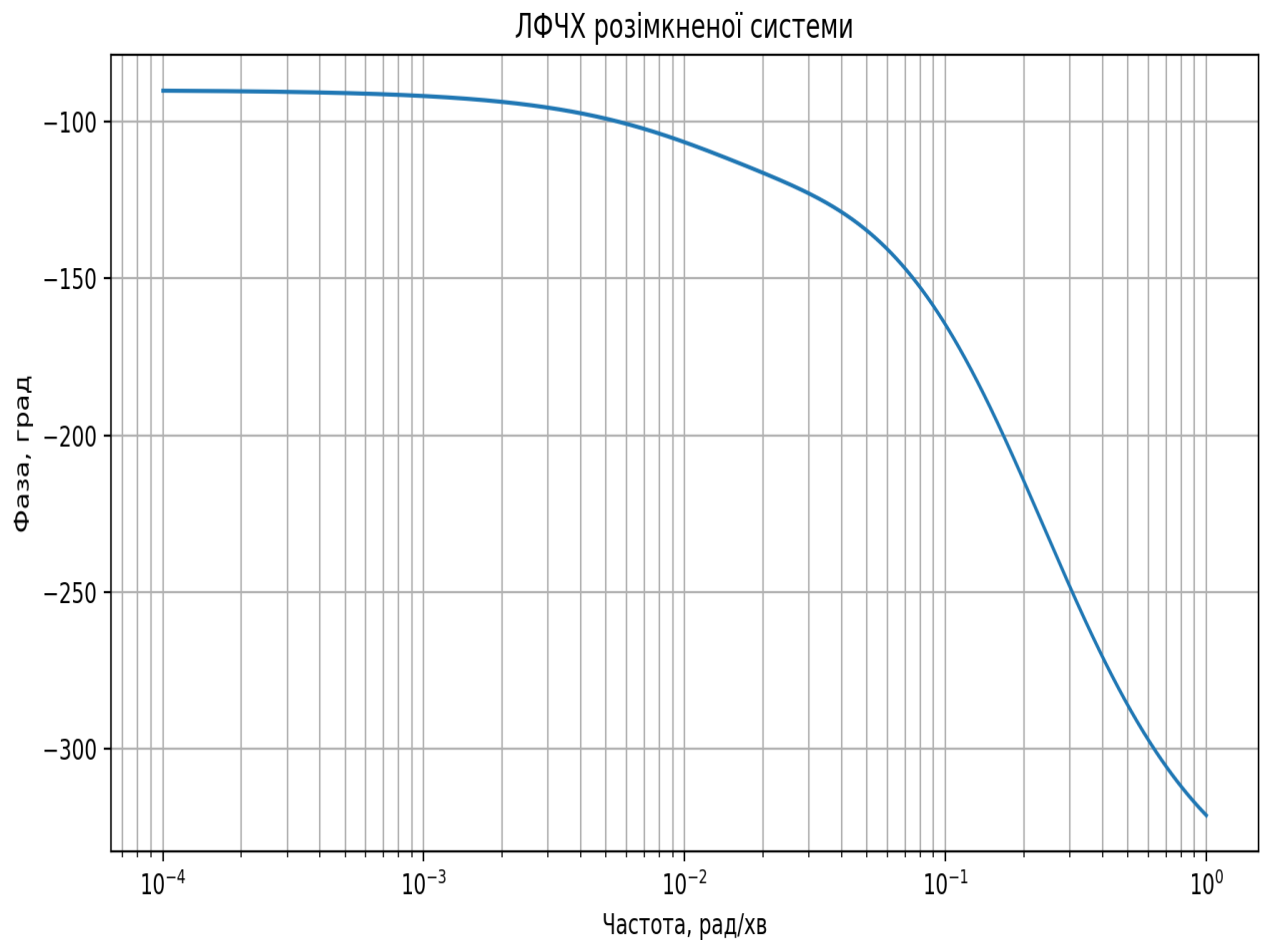


Рисунок 3.4 - Логарифмічна фазочастотна характеристика САР

На частоті зрізу фазовий зсув забезпечує запас стійкості за фазою близько $51,9^\circ$, що перевищує мінімально рекомендоване значення для промислових систем автоматичного керування. Це означає, що система має достатній запас стійкості навіть при можливих змінах параметрів об'єкта або появі додаткових збурень.

Наявність такого запасу фазової стійкості свідчить про коректно обрані параметри ПІ-регулятора.

Діаграма Найквіста дає змогу оцінити стійкість системи у комплексній площині. Побудована характеристика не охоплює критичну точку $(-1;j0)(-1;j0)(-1;j0)$, що означає виконання критерію Найквіста для замкненої системи.

					ДП.АКІТ.10658691.00.00.000ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		43

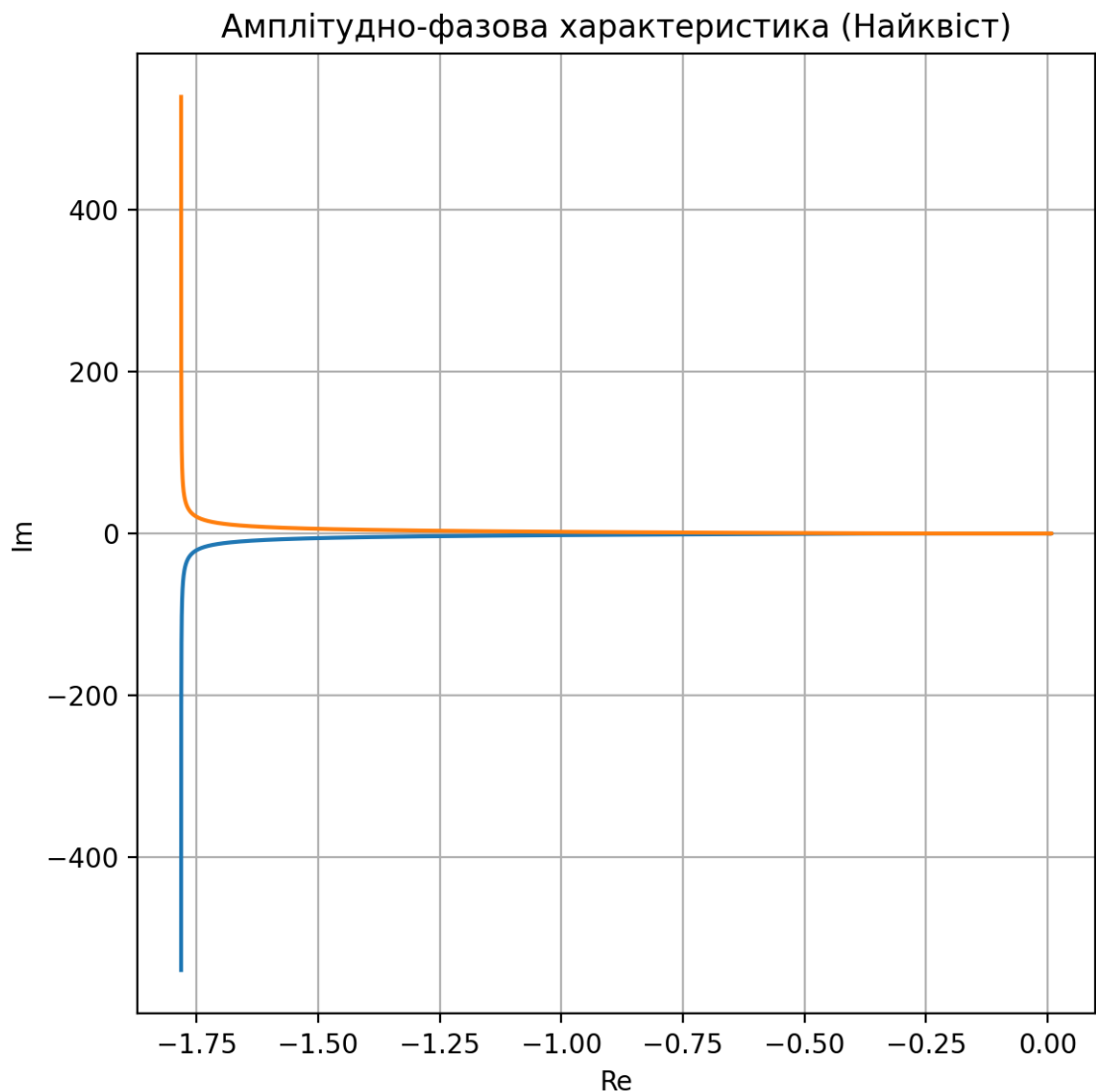


Рисунок 3.5 - Амплітудно-фазова характеристика (діаграма Найквіста)

Контур амплітудно-фазової характеристики розташований на безпечній відстані від критичної точки, що свідчить про наявність достатнього запасу стійкості. Така поведінка є типовою для інерційних теплових систем із правильно налаштованим регулятором.

Отже, діаграма Найквіста підтверджує, що система автоматичного регулювання температури овочесховища є стійкою та здатна працювати без переходу у режим самозбудження.

Комплексний аналіз часових і частотних характеристик показав, що розроблена система автоматичного регулювання температури овочесховища є стійкою, має достатній запас стійкості за фазою та забезпечує відсутність

					ДП.АКІТ.10658691.00.00.000ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		44

статичної похибки. Перехідний процес характеризується помірним перерегулюванням, що є допустимим для повільних теплових об'єктів, а отримані частотні характеристики підтверджують коректність синтезу системи регулювання.

3.4 Програмне забезпечення системи управління мікрокліматом

Розроблене програмне забезпечення призначене для моделювання та дослідження процесів автоматизованого управління мікрокліматом овочесховища в умовах, наближених до реальних експлуатаційних режимів. Програма реалізує функції емуляції динаміки температури, відносної вологості та концентрації вуглекислого газу з урахуванням впливу зовнішніх і внутрішніх збурюючих факторів, а також забезпечує візуалізацію результатів у вигляді часових графіків.

Програмний продукт (рисунок 3.6) створено мовою програмування Python із використанням бібліотек для побудови графічного інтерфейсу користувача та відображення графічної інформації. Архітектура програмного забезпечення базується на модульному підході, що передбачає розділення функціональних компонентів на блок моделювання фізичних процесів, блок формування керуючих впливів, блок інтерфейсу користувача та блок візуалізації результатів. Такий підхід забезпечує гнучкість розширення системи та можливість адаптації моделі до різних умов зберігання продукції.

Математичне ядро програми реалізує спрощену динамічну модель овочесховища як об'єкта автоматичного управління. Зміна температури, вологості та концентрації CO_2 описується різницеvими рівняннями, що враховують тепловий обмін із зовнішнім середовищем, тепловиділення продукції, процеси випаровування вологи, а також вплив вентиляції та інших виконавчих механізмів. Для апроксимації реальних процесів використано дискретний підхід із заданим кроком інтегрування, що дозволяє реалізувати чисельне моделювання в режимі реального часу.

					ДП.АКІТ.10658691.00.00.000ПЗ	Арк.
						45
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		

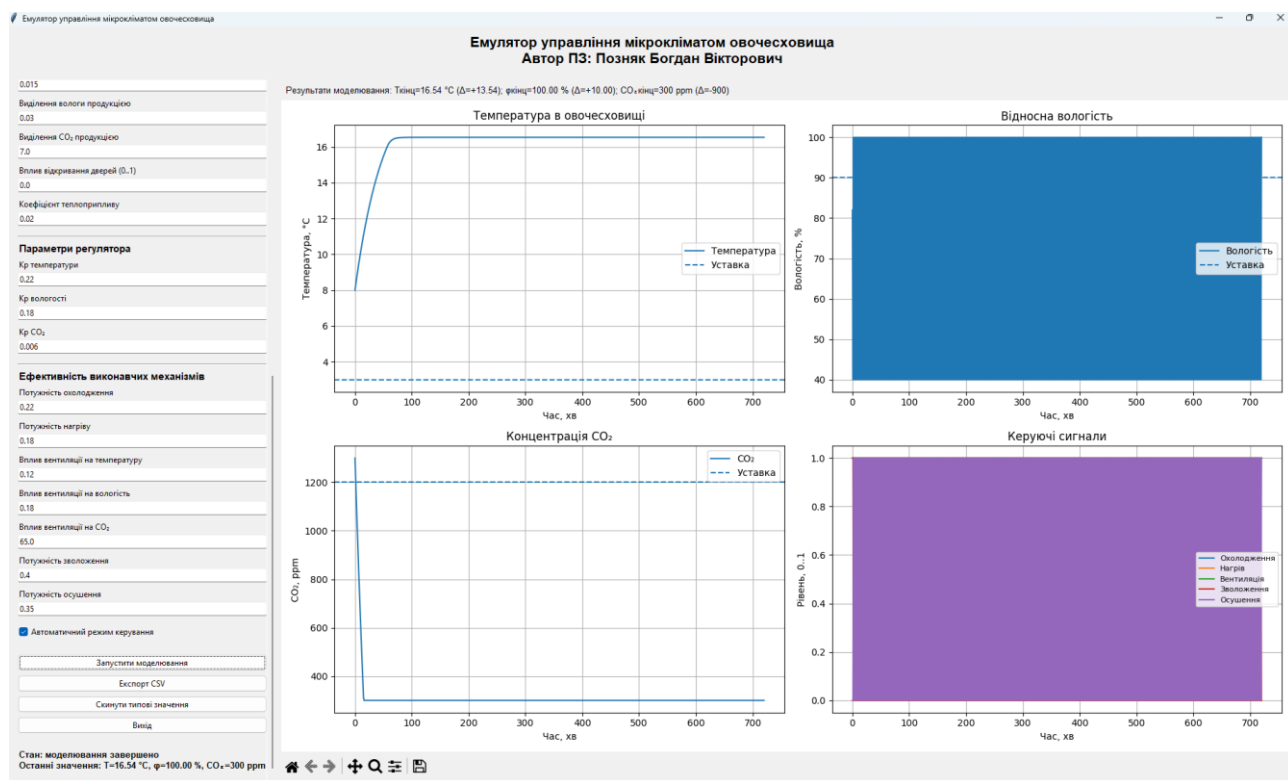


Рисунок 3.6 - Програмний засіб управління мікрокліматом овочесховища

Формування керуючих впливів здійснюється на основі пропорційних регуляторів для кожного каналу керування. Зокрема, температурний канал використовує пропорційний закон регулювання для визначення рівня охолодження або нагріву залежно від відхилення температури від заданого значення. Аналогічно реалізовано регулювання вологості та концентрації вуглекислого газу. Керуючі сигнали нормуються в діапазоні від 0 до 1, що відповідає відносній інтенсивності роботи виконавчих механізмів і може бути інтерпретовано як ступінь відкриття регулюючих органів або рівень потужності обладнання.

Графічний інтерфейс користувача забезпечує зручне введення параметрів моделювання, включаючи початкові умови, уставки, характеристики зовнішнього середовища та коефіцієнти регуляторів. Інтерфейс організований у вигляді структурованих блоків, що відповідають основним групам параметрів системи, що підвищує наочність і спрощує налаштування моделі. Користувач має

можливість змінювати параметри системи в широкому діапазоні, що дозволяє досліджувати вплив різних факторів на якість регулювання.

Важливою складовою програмного забезпечення є модуль візуалізації результатів, який реалізує побудову графіків зміни основних параметрів мікроклімату у часі. Зокрема, відображаються графіки температури, відносної вологості, концентрації CO₂, а також керуючих сигналів виконавчих механізмів. Це дозволяє оцінити динамічні властивості системи, зокрема швидкодію, перерегулювання, час встановлення та точність підтримання заданих параметрів.

Додатково передбачено можливість експорту результатів моделювання у форматі CSV, що забезпечує подальшу обробку даних у зовнішніх програмних середовищах, таких як електронні таблиці або системи аналізу даних. Це розширює функціональні можливості програмного забезпечення та дозволяє використовувати його як інструмент для проведення наукових досліджень і підготовки звітних матеріалів.

					ДП.АКІТ.10658691.00.00.000ПЗ	Арк.
						47
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		

ВИСНОВКИ

У результаті виконаного дослідження було проаналізовано технологічний процес зберігання овочевої продукції та визначено основні параметри мікроклімату овочесховища. Встановлено, що підтримання зазначених параметрів у допустимих межах є необхідною умовою забезпечення тривалого зберігання продукції та мінімізації технологічних втрат.

Досліджено існуючі системи управління мікрокліматом овочесховищ, включаючи вентиляційні системи, холодильні установки, системи автоматичного регулювання та комплекси з контрольованою атмосферою.

Розроблено структурну та принципову схеми автоматизованої системи управління мікрокліматом овочесховища. Побудовані схеми забезпечують інтеграцію вимірювальних перетворювачів, мікропроцесорного контролера, виконавчих механізмів і SCADA-рівня в єдину систему автоматичного керування.

Виконано обґрунтування вибору апаратних компонентів системи управління, включаючи датчики температури, вологості, концентрації CO₂, програмований логічний контролер, операторську панель, джерело живлення та виконавчі механізми.

Відповідно до положень класичної теорії автоматичного управління побудовано математичну модель об'єкта керування, у якій овочесховище описується як інерційний тепловий об'єкт із запізненням.

У ході дослідження стійкості та динамічних характеристик системи встановлено, що синтезована система автоматичного регулювання є стійкою, має достатній запас стійкості та забезпечує підтримання заданої температури без статичної похибки.

Програма забезпечує моделювання зміни температури, вологості та концентрації CO₂, реалізує алгоритми автоматичного керування виконавчими механізмами та дозволяє будувати графіки зміни параметрів системи в часі. динамічних властивостей системи, підбору параметрів регуляторів і навчального моделювання процесів автоматизації овочесховищ.

					ДП.АКІТ.10658691.00.00.000ПЗ	Арк.
						48
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		

ПЕРЕЛІК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Åström K.J., Murray R.M. Feedback Systems: An Introduction for Scientists and Engineers. Princeton: Princeton University Press, 2008. 408 p.
2. Basediya A. L., Samuel D. V. K., Beera V. Evaporative cooling system for storage of fruits and vegetables – A review // Journal of Food Science and Technology. 2013. Vol. 50, No. 3. P. 429–442. DOI: 10.1007/s13197-011-0311-6.
3. Chourasia M. K., Goswami T. K. CFD simulation of airflow, heat transfer and moisture loss in potato storage systems // Journal of Food Engineering. 2007. Vol. 80, No. 2. P. 672–689.
4. Documentation for SIMATIC Controller. [Електронний ресурс].- Режим доступу: <https://support.industry.siemens.com/cs/document/109744173/documentation-for-simatic-controller?dti=0&lc=en-UA>
5. Eltawil M. A., Samuel D. V. K. Potato Storage Technology and Store Design Aspects // CIGR Electronic Journal. 2006. Vol. 8. Manuscript FP 05 014. P. 1–31.
6. Grubben G., Keesman K. J. Dynamic modelling and optimisation of large-scale potato storage facilities // Biosystems Engineering. 2019. Vol. 178. P. 154–169.
7. Grubben G., Keesman K. J. Modelling of potato storage systems: A review // Biosystems Engineering. 2015. Vol. 129. P. 111–125.
8. Isakov A. Automatic control system for automatic maintenance of microclimate in vegetable storages // *E3S Web of Conferences*. 2023. Vol. 95. Article 01012. URL: https://www.e3s-conferences.org/articles/e3sconf/pdf/2023/95/e3sconf_emmft2023_01012.pdf (дата звернення: 11.02.2026).
9. Isakov A., Golovko A., Kurilo V. Automatic control system for automatic maintenance of microclimate in vegetable storages // *E3S Web of Conferences*. 2023. Vol. 471. Article 01012. URL: https://www.researchgate.net/publication/376309692_Automatic_control_system_for_automatic_maintenance_of_microclimate_in_vegetable_storages (дата звернення: 08.06.2026).

					ДП.АКІТ.10658691.00.00.000ПЗ	Арк.
						49
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		

10. Lepse L. Influence of controlled atmosphere on the carrot storage quality // *Proceedings of scientific conference*. 2014. URL: <https://agris.fao.org/search/en/providers/122535/records/65de3bbf0f3e94b9e5cc361e> (дата звернення: 11.02.2026).

11. Lu T., Liu Z. Temperature Control System of Cold Storage // *Advances in Computer Science Research*. 2015. Vol. 15. P. 191–195. URL: <https://www.atlantispress.com/article/25842598.pdf> (дата звернення: 11.02.2026).

12. Modbus manual. [Електронний ресурс].- Режим доступу: <https://www.modbus.org/file/secure/modbusprotocollspecification.pdf>

13. Node red user guide. [Електронний ресурс].- Режим доступу: <https://nodered.org/docs/user-guide/>

14. Problems of automation of fresh fruits and vegetables storage facilities // *Матеріали міжнародної науково-технічної конференції*. 2020. URL: <https://mcitdoc.org.ua/index.php/ITConf/article/download/147/97/629> (дата звернення: 11.02.2026).

15. Python Documentation. [Електронний ресурс].- Режим доступу: <https://docs.python.org/3/>

16. Raspberry Pi Documentation. [Електронний ресурс].- Режим доступу: <https://www.raspberrypi.com/documentation/>

17. Van den Berg J. Recent developments in potato storage in Europe // *Potato Journal*. 2013. Vol. 40, No. 2. P. 189–194.

18. Zewdie B., Defraeye T., Verboven P. CFD-based design and evaluation of an onion curing and storage system // *Biosystems Engineering*. 2022. Vol. 214. P. 125–140.

19. Zhen Q., Zhang Y., Wang H., Li X. Research on the temperature and humidity distribution in a potato storage environment based on CFD simulation and experimental validation // *Frontiers in Sustainable Food Systems*. 2025. Vol. 9. Article 1594791. DOI: 10.3389/fsufs.2025.1594791.

20. Гончар В.Ф. Електрообладнання і автоматизація с.-г. агрегатів і установок. – К.: Вища школа, 1985. – 208 с. Автоматизація систем

					ДП.АКІТ.10658691.00.00.000ПЗ	Арк.
						50
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		

теплопостачання і вентиляції [Текст] : методичні вказівки/ С.М. Нубарян – Харків: ХНАМГ, 2009. – 9 с.

21. ДБН В.2.5-67:2013. Опалення, вентиляція та кондиціонування. Київ: Міністерство регіонального розвитку України, 2013.

22. Санітарні норми мікроклімату [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://zakon.rada.gov.ua/rada/show/va042282-99#Text> – Дата звернення 17.10.2022 р

					ДП.АКІТ.10658691.00.00.000ПЗ	Арк.
						51
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		