

**НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ БІОРЕСУРСІВ
І ПРИРОДОКОРИСТУВАННЯ УКРАЇНИ**
ІНСТИТУТ ЕНЕРГЕТИКИ, АВТОМАТИКИ І ЕНЕРГОЗБЕРЕЖЕННЯ

ПОГОДЖЕНО
Директор ІНІ енергетики,
автоматики і енергозбереження
(назва ІНІ)

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

проф., д.т.н. _____ **В.В. Каплун**
(підпис) (ПІБ)

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

« ____ » _____ 2026 р.

« ____ » _____ 2026 р.

МАГІСТЕРСЬКА КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

на тему: **«РОЗРОБКА СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ МІКРОКЛІМАТОМ
ОВОЧЕСХОВИЩА З АЛГОРИТМАМИ УПЕРЕДЖЕНОГО
ПРОГНОЗУВАННЯ»**

Спеціальність:
174 – «Автоматизація, комп'ютерно-інтегровані технології та робототехніка»
(шифр і назва)

Освітня програма:
Автоматизація, комп'ютерно-інтегровані технології та робототехніка
(назва)

Орієнтація освітньої програми: освітньо-наукова
(назва)

Гарант освітньої програми

_____ **Д.Т.Н., професор**
(науковий ступінь та вчене звання)

_____ (підпис)

Івашук В.В.
(П.І.Б.)

Керівник магістерської кваліфікаційної роботи

_____ **Д.Т.Н., професор**
(науковий ступінь та вчене звання)

_____ (підпис)

Івашук В.В.
(П.І.Б.)

_____ **СТ. викладач**
(науковий ступінь та вчене звання)

_____ (підпис)

Руденський А.А.
(П.І.Б.)

Виконав

_____ (підпис)

Лашко І.О.
(П.І.Б студента)

КИЇВ-2026

**НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ БІОРЕСУРСІВ
І ПРИРОДОКОРИСТУВАННЯ УКРАЇНИ
ІННІ ЕНЕРГЕТИКИ, АВТОМАТИКИ І ЕНЕРГОЗБЕРЕЖЕННЯ**

ЗАТВЕРДЖУЮ

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

К.Т.Н., доц. _____ **О.О. Опришко**
« ____ » _____ 2024 р.

ЗАВДАННЯ
ДО ВИКОНАННЯ МАГІСТЕРСЬКОЇ КВАЛІФІКАЦІЙНОЇ РОБОТИ ЗДОБУВАЧУ
Лашку Іллі Олексійовичу

Спеціальність:

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

Освітньо-професійна програма:

Автоматизація, комп'ютерно-інтегровані технології та робототехніка

Орієнтація освітньої програми: освітньо-наукова

Тема магістерської кваліфікаційної роботи **«Розробка системи керування мікрокліматом овочесховища з алгоритмами упередженого прогнозування»**,

затверджена наказом від 22.10.2025 року №2440«С»

Термін подання студентом магістерської роботи 22.05.2026 року

Вихідні дані магістерської кваліфікаційної роботи: завдання кафедри на виконання магістерської кваліфікаційної роботи; нормативні документи по проектуванню об'єктів автоматизації; матеріали дослідження, аналізу та моделювання; наукова література з тематики магістерської роботи.

Перелік питань, що підлягають дослідженню:

1. Аналіз та дослідження овочесховища як об'єкта автоматизації
2. Обґрунтування вибору технічних засобів автоматизації.
3. Розробка функціональних та принципових схем системи автоматизації.
4. Створення SCADA-системи підтримки мікроклімату в овочесховищі
5. Розробка алгоритму керування мікрокліматом з елементами упередженого прогнозування.
6. Охорона праці та техніко-економічне обґрунтування.

Дата видачі завдання «09» листопада 2024 року

Керівник магістерської кваліфікаційної роботи

(Підпис)

(Підпис)

(Підпис)

Іващук В.В.
(Прізвище та ініціали)

Руденський А.А.
(Прізвище та ініціали)

Лашко І.О.
(Прізвище та ініціали)

Завдання прийняв до виконання

№ рядка	Формат.	Позначення	Найменування	Кількість аркушів	Примітка
		<u>Текстові документи</u>			
1	A4	02.06-МКР.2440"С".2025.10.22.06.ПЗ	Пояснювальна записка	151	
		<u>Графічні документи</u>			
2	A4	02.06-МКР.2440"С".2025.10.22.06.A2	Функціональна схема автоматизації	1	Додаток А
3	A2	02.06-МКР.2440"С".2025.10.22.06.E3	Схема електрична принципова	1	Додаток Б
4	A2	02.06-МКР.2440"С".2025.10.22.06.E4	Схема електричних з'єднань	1	Додаток В
5	A3	02.06-МКР.2440"С".2025.10.22.06.E5	Схема електричних підключень	1	Додаток Г
6	A3	02.06-МКР.2440"С".2025.10.22.06.A7	Зовнішній вигляд щита керування	1	Додаток Д
7	A3	02.06-МКР.2440"С".2025.10.22.06.C8	Постер	1	

АНОТАЦІЯ

Лашко Ілля Олексійович. Розробка системи керування мікрокліматом овочесховища з алгоритмами упередженого прогнозування. Кваліфікаційна робота магістра. Спеціальність 174 – Автоматизація, комп'ютерно-інтегровані технології та робототехніка. Національний Університет Біоресурсів та Природокористування України, 2026 р.

У рамках магістерської кваліфікаційної роботи розглянуто технологічний процес зберігання овочевої продукції. Проведено аналіз різних типів овочесховищ та визначено методи зберігання овочів. Обґрунтовано необхідність впровадження автоматизації процесів зберігання овочів та розроблено функціональну схему автоматизації

Особливістю роботи є застосування алгоритму упередженого прогнозування, який дозволяє здійснювати попереджувальне коригування режимів роботи обладнання на основі прогнозу зміни температури та вологості. У результаті розроблено математичну модель об'єкта керування, реалізовано алгоритм прогнозування та проведено моделювання роботи системи.

Проведено дослідження стійкості та якості функціонування системи автоматичного регулювання, побудовано перехідний процес об'єкта керування та отримано вартість розробленої системи. Результати проведених розрахунків демонструють ефективність використання такої системи.

Розроблено програму та алгоритм керування системою, реалізовано SCADA-систему і візуалізацію технологічного процесу.

Ключові слова: інтелектуальна система, комп'ютерно-інтегрована система, мікроклімат, овочесховище, автоматизація, програмовані логічні контролери (ПЛК), технічні засоби АКУТЕК, засоби автоматизації, система автоматичного регулювання (САР), контроль.

ANNOTATION

Lashko Illia. Development of a Microclimate Control System for Vegetable Storage with Predictive Algorithms. Master's Qualification Thesis. Specialty 174 – Automation, Computer-Integrated Technologies and Robotics. National University of Life and Environmental Sciences of Ukraine, 2026.

Within the framework of the master's qualification thesis, the technological process of vegetable storage is considered. An analysis of various types of vegetable storage facilities is carried out, and methods of vegetable preservation are determined. The necessity of implementing automation in vegetable storage processes is substantiated, and a functional automation scheme is developed.

A distinctive feature of the work is the application of a predictive (anticipatory) algorithm, which enables proactive adjustment of equipment operating modes based on forecasts of temperature and humidity changes. As a result, a mathematical model of the control object is developed, the forecasting algorithm is implemented, and system performance is simulated.

A study of the stability and quality of the automatic control system is conducted, the transient response of the control object is constructed, and the cost of the developed system is determined. The results of the calculations demonstrate the efficiency of using such a system.

A control program and algorithm are developed, a SCADA system is implemented, and visualization of the technological process is provided.

Keywords: intelligent system, computer-integrated system, microclimate, vegetable storage, automation, programmable logic controllers (PLC), OWEN technical equipment, automation tools, automatic control system (ACS), monitoring.

ЗМІСТ

ВСТУП.....	8
РОЗДІЛ 1. ТЕХНОЛОГІЧНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ ОБ'ЄКТА АВТОМАТИЗАЦІЇ.....	9
1.1. Аналіз об'єкта керування	9
1.2. Виробнича характеристика об'єкта автоматизації.....	15
1.3. Розробка параметричної та функціональної схем автоматизації ...	20
РОЗДІЛ 2. ПОБУДОВА ТА ДОСЛІДЖЕННЯ МАТЕМАТИЧНОЇ МОДЕЛІ ОБ'ЄКТА КЕРУВАННЯ	24
2.1. Розробка і використання математичної моделі ОК.....	24
2.2 Розрахунок даних по математичній моделі	35
2.3. Побудова та дослідження імітаційної моделі ОК.....	38
2.4. Визначення оптимального управління методом динамічного програмування.....	47
РОЗДІЛ 3. СИНТЕЗ ТА АНАЛІЗ СИСТЕМИ АВТОМАТИЧНОГО КЕРУВАННЯ	49
3.1. Вибір алгоритму керування.....	49
3.2. Вибір технічних засобів.....	53
3.3 Визначення передатної функції	64
3.4. Визначення періоду квантування сигналів цифрової системи керування.....	71
3.5. Дослідження цифрового ПІД-регулятора	75
3.6. Дослідження цифрового ПІД-регулятора на стійкість та якість	80
РОЗДІЛ 4. АПАРАТНА РЕАЛІЗАЦІЯ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ ТА ОЦІНКА ЇЇ НАДІЙНОСТІ	83
4.1. Вибір регулятора та периферії	83
4.2. Вибір пускозахисної апаратури, проводів та кабелів	91
4.2.1 Вибір автоматичних вимикачів	91
4.2.2 Вибір електромагнітних пускатрів	93
4.2.3 Вибір теплових реле	95
4.2.4 Вибір запобіжника	96
4.2.5 Вибір трансформатора	96

4.2.6 Вибір блока живлення	97
4.2.7 Вибір кнопок та перемикачів	97
4.2.8 Вибір сигнальних ламп	99
4.3. Вибір проводів та кабелів	99
4.4 Розробка електричної принципової схеми	101
4.5 Розробка схеми з'єднань	104
4.6 Розробка схеми підключень	107
4.7 Розробка та вибір щита керування	108
4.8 Розрахунок надійності системи автоматичного керування	109
РОЗДІЛ 5. РОЗРОБКА ПРОГРАМНОГО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ТА ІНТЕЛЕКТУАЛЬНОЇ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ МІКРОКЛІМАТОМ	112
5.1. Розробка алгоритму функціонування системи	112
5.2. Впровадження інтелектуальної системи керування мікрокліматом із використанням SysML-діаграм	114
5.3. Реалізація програми керування системою для контролера	116
5.4. Реалізація SCADA-системи	120
5.5. Розробка мобільного додатку інтегрованої системи моніторингу та керування	122
5.6. Реалізація алгоритму упередженого прогнозування параметрів мікроклімату	127
РОЗДІЛ 6. ОХОРОНА ПРАЦІ ТА ТЕХНІКА БЕЗПЕКА	132
6.1. Охорона праці	132
6.2. Вимоги безпеки обслуговуючого персоналу	134
6.3. Визначення опору заземлюючого пристрою	136
РОЗДІЛ 7. ТЕХНІКО-ЕКОНОМІЧНЕ ОБГРУНТУВАННЯ	139
7.1. Розрахунок техніко-економічної ефективності автоматизації систем керування технологічними процесами у сільськогосподарському виробництві	139
ВИСНОВОК	145
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	148
ДОДАТОК	152

ВСТУП

Сучасна автоматизація агропромислового комплексу не стоїть на місці. В умовах постійного зростання обсягів виробництва та необхідності задоволення високих стандартів якості, розробка і впровадження інноваційних систем керування мікрокліматом стають все більш актуальними. Однією з ключових галузей, де автоматизація може підвищити якість та ефективність виробництва є зберігання овочевої продукції.

Автоматизація підтримки мікроклімату в овочесховищі має важливе значення і є перспективним напрямком інженерних та наукових розробок. Такі системи зазвичай виконують регулювання температурно-вологісних параметрів у біологічному середовищі та навколишньому повітрі. Тоді як склад і потужність окремих агрегатів та установок залежать від таких чинників, як вид і призначення продукції, що зберігається, та терміни її зберігання.

Сучасні технологічні процеси попереднього охолодження, а саме, швидке зниження температури є найнадійнішими та поширеними способами зберігання овочевої продукції. Варто зазначити, що режим зберігання продукції в овочесховищах встановлюють на основі вивчення її властивостей, тривалості зберігання, виду упаковки та ін.

Метою даної магістерської кваліфікаційної роботи є розробка інтелектуальної комп'ютерно-інтегрованої системи керування мікрокліматом в овочесховищі з алгоритмами упередженого прогнозування та використання технічних засобів автоматизації. Результати цієї роботи сприятимуть підвищенню ефективності управління процесами зберігання овочів, зниженню енергетичних витрат та покращенню якості продукції, що зберігається.

РОЗДІЛ 1. ТЕХНОЛОГІЧНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ ОБ'ЄКТА АВТОМАТИЗАЦІЇ

1.1. Аналіз об'єкта керування

Об'єктом керування є овочесховище закритого типу, призначене для довготривалого зберігання овочевої продукції (картоплі, моркви, буряка, цибулі тощо). Основною метою функціонування овочесховища є забезпечення стабільних параметрів мікроклімату, що мінімізують втрати маси продукції, запобігають розвитку мікроорганізмів та уповільнюють фізіологічні процеси дихання овочів.

Овочесховище є інерційним тепло- та вологообмінним об'єктом з розподіленими параметрами, в якому постійно відбуваються процеси:

- теплообміну між продукцією та повітрям,
- масообміну (випаровування вологи),
- біологічного тепловиділення продукцією,
- вентиляційного повітрообміну.

Овочесховища бувають різних розмірів, залежно від обсягу продукції, яку необхідно зберігати. Зазвичай, їхні стіни будують з цегли або бетону, що забезпечує хорошу теплоізоляцію, важливу для підтримання оптимального мікроклімату всередині. Дах овочесховища також повинен бути добре утепленим. Правильно виконана теплоізоляція овочесховищ істотно скорочує витрати на підтримку необхідних температурних умов.

Сучасні овочесховища переважно є спорудами, які зводяться на основі металевого каркаса з використанням сендвіч-панелей або полистової збірки.

Такі приміщення зручні для зберігання великої кількості овочів протягом зими, забезпечуючи їх цілісність і збереження всіх корисних властивостей. Крім того, такі сховища мають високу теплоізоляційну здатність, міцність та строк експлуатації, що дозволяє зберігати оптимальну температуру всередині овочесховища та витривалість до впливу зовнішніх факторів.

Однією з основних вимог до овочесховищ є створення оптимального температурного режиму, тому утепленню слід приділяти особливу увагу. Якісна теплоізоляція овочесховищ і холодильних камер для зберігання овочів значно знижує витрати на підтримання необхідних температурних умов. Використання сучасних матеріалів, таких як пінополіуретан, дозволяє зберегти врожай протягом тривалого часу з мінімальними тепловтратами.

На сьогоднішній день овочесховища розподіляють по таким типам:

- універсальні;
- спеціалізовані.

Універсальні – це ті сховища в яких можна зберігати не один вид коренеплодів, плодів і ягід. Спеціалізовані – це сховища, в яких ми можемо зберігати тільки один вид продукту.

Також овочесховища по тривалості експлуатації розділяються на:

- постійні сховища;
- короткотривалі.

Постійними називають такі сховища, в яких наявні стаціонарні споруди, які будуть використовуватися круглий рік, але за умови хорошої теплоізоляції і системи опалення.

Короткотривалі сховища – це споруди, призначені для тимчасового зберігання, зазвичай розташовані неподалік від місця збору врожаю. Вони

виглядають як траншеї або бурти. Цей спосіб зберігання є найдоступнішим і використовується для коренеплодів.

За конструкцією короткотривалі сховища поділяються на безкаркасні (ангари арочного типу) та каркасні. Безкаркасні споруди можуть зводитися на будь-якій місцевості, процес їх будівництва досить простий. Використовуються спеціальні арочні елементи зі сталі, які виконують несучу та огорожувальну функцію. Такі сховища відрізняються надійністю в експлуатації, мають властивості монолітних будівель, а також характеризуються пожежостійкістю та міцністю.



Рис. 1.1. Вигляд безкаркасного сховища арочного типу



Рис. 1.2. Вигляд каркасного сховища

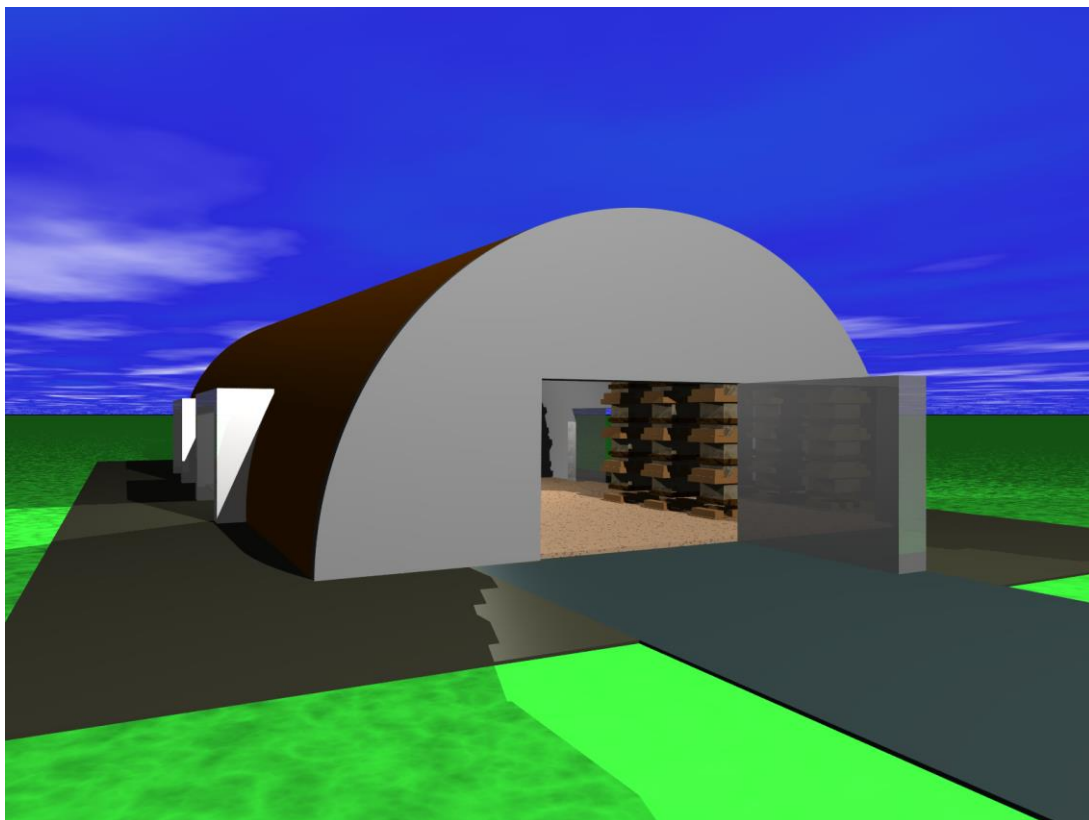


Рис. 1.3. Вигляд 3D-моделі безкаркасного сховища арочного типу



Рис. 1.4. Внутрішній вигляд 3D-моделі безкаркасного сховища арочного типу



Рис. 1.5. Вигляд овочесховища всередині

Кожен з цих типів овочесховищ побудований для певної методики ефективного зберігання. Для цього необхідно обирати відповідні методи, що забезпечують тривале збереження якості та мінімізацію втрат. Одним з ключових аспектів цього процесу є правильний вибір способу зберігання, що залежить від особливостей продукції, умов її вирощування та місця зберігання. Розглянемо основні методи зберігання, їх переваги та специфіку використання в різних умовах.

Секційне зберігання, яке передбачає зберігання насипом, є одним з найперспективніших методів. При цьому сховище ділиться на автономні секції, що дозволяє зберігати різні види і сорти овочів в одному приміщенні.

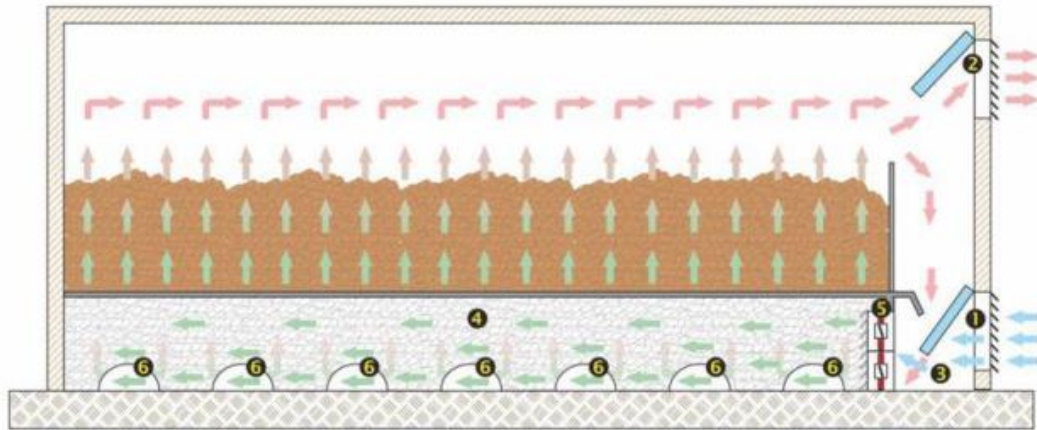


Рис. 1.6. Секційний спосіб зберігання овочевої продукції

Також, широко використовується зберігання продукції в жорсткій тарі (ящики, контейнери), що забезпечує повну механізацію всіх вантажно-розвантажувальних робіт. Використання тари виключає перевалку овочів, зменшує їх пошкоджуваність і втрати при зберіганні. Овочі завантажуються в ящики або контейнери прямо в полі, транспортуються і розміщуються в сховище в такому вигляді.

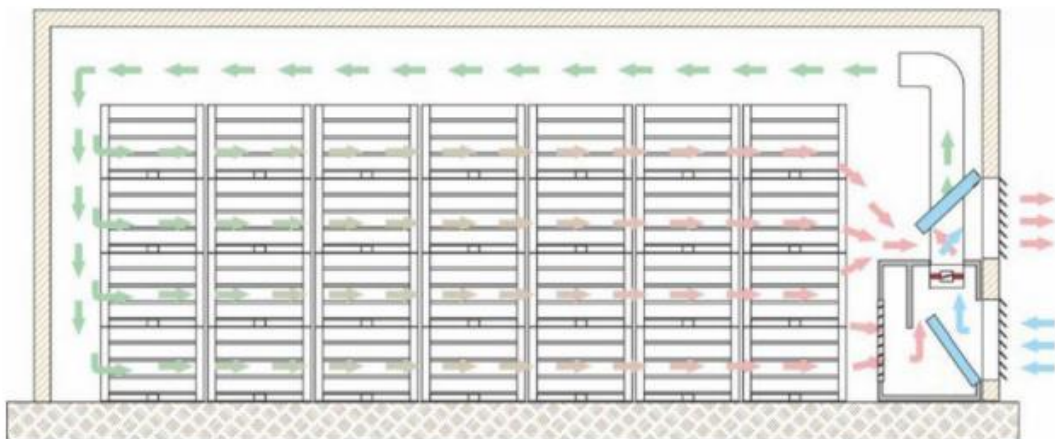


Рис. 1.7. Контейнерний спосіб зберігання овочевої продукції

Існують різні погляди щодо ефективності та доцільності насипного і тарного способів зберігання овочів. На плодоовочевих підприємствах у великих містах, де продукцію не тільки зберігають, але й готують до реалізації (сортують, калібрують, розфасовують), більш ефективним є тарний спосіб, який дозволяє механізувати основні види робіт.

У місцях вирощування овочів, у фермерських господарствах, найбільш прийнятними є закромний і насипний способи із застосуванням активного вентилявання.

Розглянувши всі можливі варіанти овочесховищ, найбільш ефективним виявилось сховище арочної конструкції. Для зручного транспортування та сортування використовуватимемо контейнерний спосіб зберігання овочевої продукції. Щодо розмірів овочесховища, обрано такі характеристики сховища: довжина – 80 м, ширина – 30 м, висота – 3 м, що забезпечує загальний об'єм 7200 м³. Овочесховище утеплене пінополіуретаном, який ефективно зберігає тепло. Основні характеристики овочесховища були підібрані відповідно до потреб збереження продукції, з максимальною ємністю 1000 тонн.

1.2. Виробнича характеристика об'єкта автоматизації

Визначившись з основними характеристиками овочесховища, переходимо до основних вимог збереження овочів. Найважливішим чинником зберігання продукції є температура. Навіть після збирання овочі залишаються біологічно активними об'єктами, у яких відбуваються процеси дихання, тепло- та масообміну. І саме інтенсивність дихання безпосередньо залежить від температури, так як з її збільшенням швидкість біохімічних реакцій зростає, що призводить до прискореного використання поживних речовин та зменшенню терміну зберігання.

Проте надмірне зниження температури також є небезпечним, оскільки може викликати фізіологічні пошкодження тканин, підморожування та втрату товарних властивостей продукції.

Тому в кожному овочесховищі обов'язково є контур підтримки відповідних температурних режимів, такі як калорифери, а також належна вентиляція для кожного виду овочевої чи фруктової продукції. Саме ефективна вентиляція дає змогу скоротити витрати на зберігання плодоовочевої продукції, особливо тоді, коли вона надходить на зберігання з підвищеною проти норми вологістю, що спостерігається при збиранні врожаю в дощову погоду.

В основному застосовують такі системи вентиляції сховищ:

- 1) природну або припливно-витяжну;
- 2) примусову – повітря в сховище подається вентиляторами;
- 3) активну – повітря під тиском у певній кількості продувається безпосередньо крізь продукцію знизу вверх, або зверху вниз.

В даному випадку вентиляція буде активною, так як буде в собі мати як припливно-витяжну, так і примусову вентиляцію.

Не менш важливим фактором є відносна вологість повітря, що безпосередньо впливає на якість та товарний вигляд продукції. Під час зберігання овочева продукція постійно здійснює процес дихання та транспірації, унаслідок чого відбувається випаровування вологи з поверхні плодів. При зниженій відносній вологості повітря інтенсивність випаровування зростає, що призводить до:

- втрати маси продукції;
- в'янення та зморщування;
- погіршення товарних характеристик.

Особливо чутливими до цього є картопля, морква та буряк, для яких рекомендовані значення вологості становлять 85-95 %. В одночас надмірна вологість повітря також є небажаною, оскільки сприяє розвитку грибкових захворювань, утворення конденсату на поверхні продукції та на стінах

огороджувальної конструкції, що призводить до гниття та псування. Таким чином система повинна контролювати не тільки температурний, а й вологісний режим.

Регулювання вологості здійснюється шляхом керування вентиляційними потоками та роботою парозволожувача, що дозволяє компенсувати як дефіцит, так і надлишок вологи у повітрі овочесховища.

Враховуючи такі фактори, як тип овочів, тривалість зберігання та доступні технології, важливо обрати оптимальний метод зберігання для забезпечення максимальної якості і тривалості зберігання продукції. Відповідно до завдання, в овочесховищі повинно зберігатися кілька видів продукції з подібними технологічними умовами зберігання. Тому розглянемо технологічні умови зберігання основних видів овочевої продукції.

Таблиця 1.1

Рекомендовані умови зберігання видів овочевої продукції

Культура	Термін збереження, діб	Температура, °C	Відносна вологість повітря, %
Огірки	10 - 15	+7..+10	92 - 95
Капуста кочанна	210 - 240	0	До 90
Морква	150 - 180	+1	92 - 95
Буряк	180	0	92 - 95
Картопля	240	+4..+5	92 - 95
Цибуля ріпчата	240	-1	70 - 75
Перець	Макс. 21	+8..+9	90 - 93
Помідори зрілі	7	+8..+10	80 - 85
Гарбуз	90	+10	60 - 70
Кукурудза	7	0	92 - 95

В даному випадку, спираючись на основні характеристики сховища, основним продуктом зберігання буде картопля.

Ознайомившись з умовами зберігання різних видів овочевої продукції, зокрема картоплі, розглянемо основні умови та особливості процесу зберігання картоплі в овочесховищі характеризуються наступними факторами.



Рис. 1.8. Структурна схема особливостей зберігання овочів у овочесховищі

Картоплю зберігають у ящиках або поліетиленових мішечках з отворами по всьому периметру. Такий метод називається контейнерним зберіганням. Температура всередині контейнерів підтримується на рівні $+3\text{--}4^\circ\text{C}$, а відносна вологість є максимальною. Вентиляція здійснюється за допомогою зовнішнього повітря або суміші внутрішнього та зовнішнього повітря взимку.

Для ефективного зберігання картоплі існують режими зберігання, що діляться на 3 періоди:

- Лікувальний;
- Охолодження;
- Зберігання.

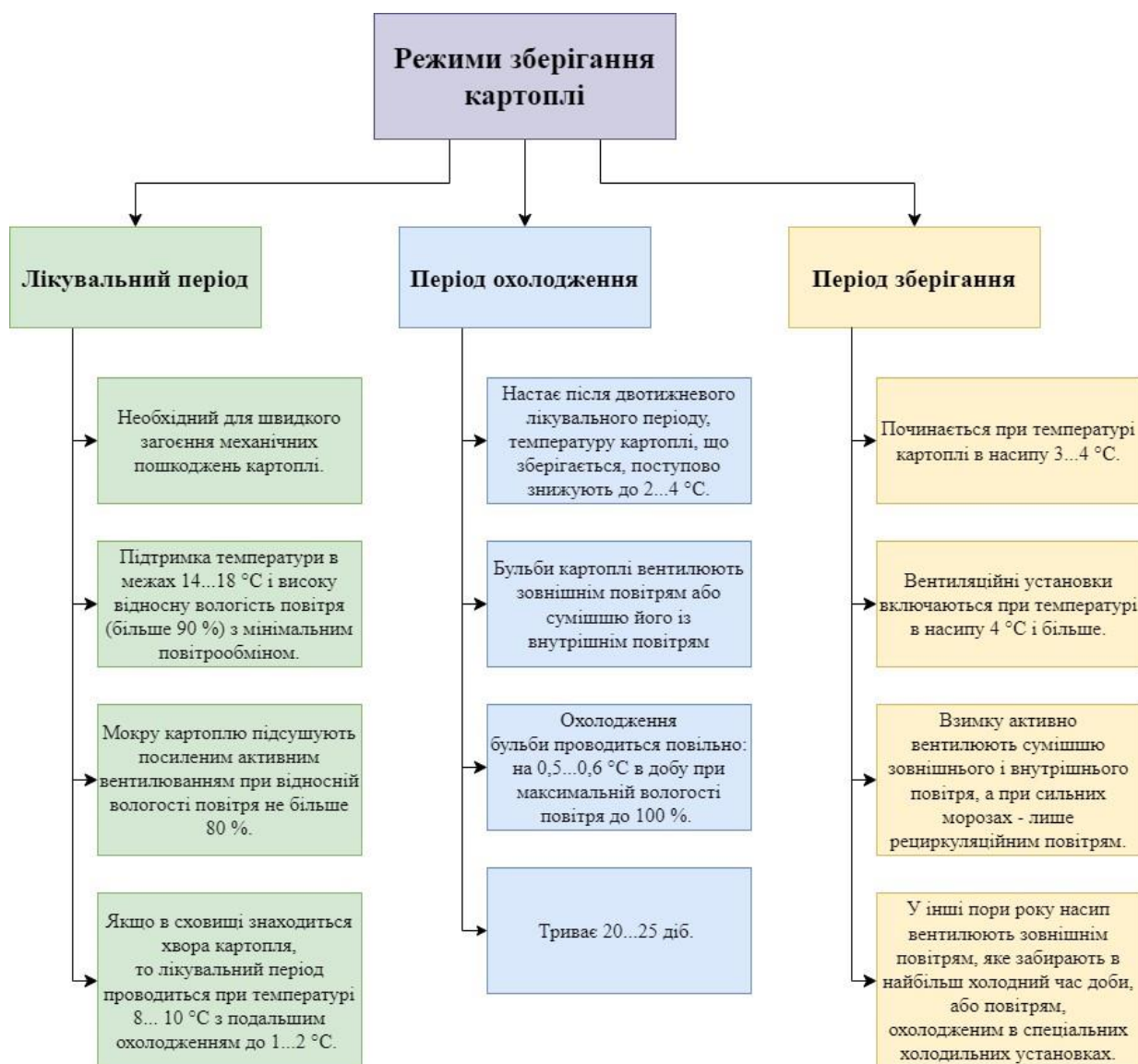
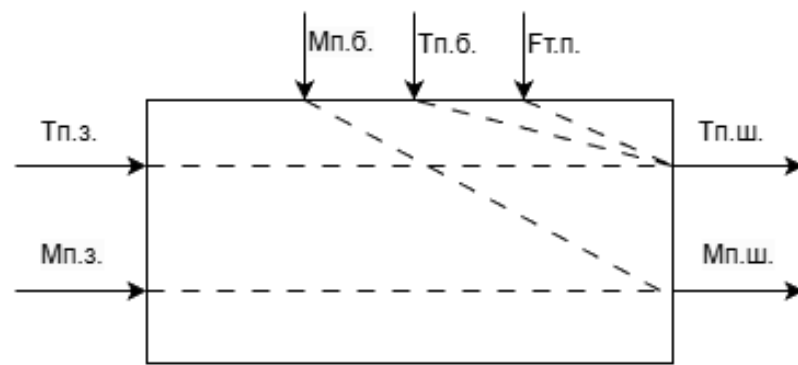


Рис. 1.9. Структурна схема технології та режимів зберігання картоплі у овочесховищі

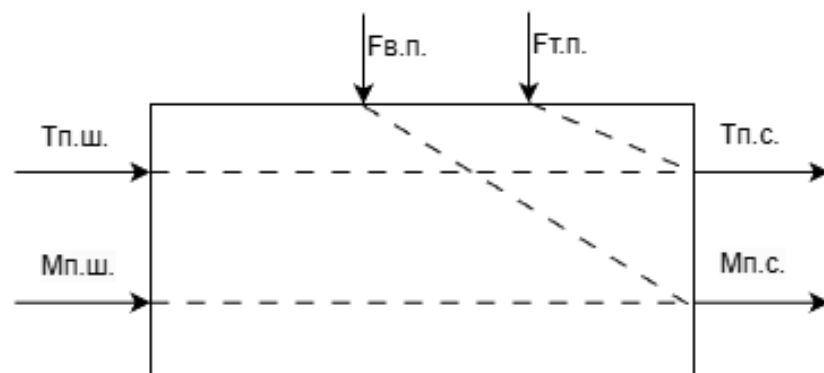
Для створення оптимального мікроклімату при контейнерному зберіганні зазвичай використовується загальнообмінна вентиляція. Переваги цього методу зберігання включають зручність контролю та сортування овочів під час зберігання, а також простішу систему подачі повітря в овочесховище, що забезпечується загальнообмінною вентиляцією.

1.3. Розробка параметричної та функціональної схем автоматизації

Для того, щоб наглядно побачити технологію регулювання та підтримки основних параметрів мікроклімату в овочесховищі, таких як температура та вологість, необхідно побудувати параметричну схему. За допомогою неї можна визначити необхідність автоматизованого керування цими параметрами з метою створення оптимальних умов для тривалого зберігання продукції та запобігання її псуванню.



а)



б)

Рис. 1.10. Параметрична схема об'єкта: а) – припливної шахти; б) – сховища

На даній схемі позначено такі параметри:

- $T_{п.з.}$ – температура зовнішнього повітря;
- $M_{п.з.}$ – вологість зовнішнього повітря;
- $F_{т.п.}$ – витрати теплого повітря;
- $T_{п.б.}$ – температура в середині будівлі;
- $M_{п.з.}$ – вологість в середині будівлі;
- $T_{п.ш.}$ – температура повітря в повітропроводі;
- $M_{п.ш.}$ – вологість в повітропроводі;
- $F_{в.п.}$ – витрати вологості повітря;
- $T_{п.б.}$ – температура в сховищі;
- $M_{п.з.}$ – вологість в сховищі;

Побудувавши параметричні схеми об'єкта, необхідно розробити схему, що показує пристрої і засоби автоматизації розгорнутим способом. Такий проектний документ має назву функціональна схема автоматизації. У верхній частині зображується елементи, такі як виконавчі механізми, давачі, трубопроводи та процеси, що протікають в окремих функціональних колах, тоді як в нижній частині розташовані позначення вимірюваної величини та функції приладів, а також позиційне позначення комплекту вимірювання або його окремих елементів.

В даному випадку об'єктом керування є овочесховище. На схемі розташовані такі функціональні елементи, як калорифер, двигуни, вентилятори, заслінки, клапани, давачі та вентиляційні системи.

Цими елементами можна керувати за допомогою різних перемикачів або кнопок, які зазвичай зображуються на схемі ручними керуючими елементами як прилади на щиті.

Кожні функціональні елементи зв'язані контурами технологічного обладнання, які уособлюють собою лінії зв'язку, кінці яких нумеруються в місцях розриву арабською цифрою пов'язуючи тим самим зв'язані елементи схеми та щита керування.

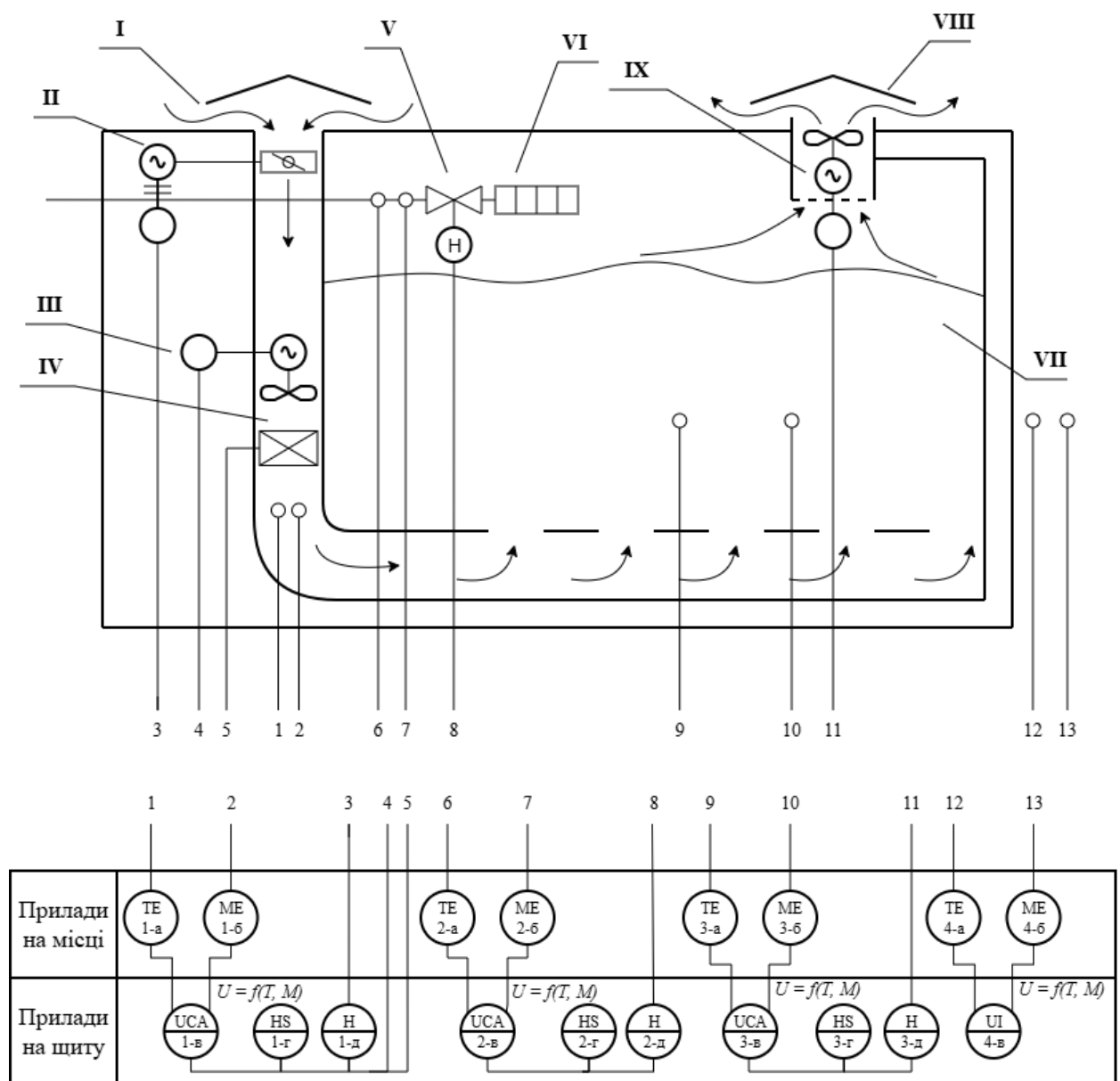


Рис. 1.11. Функціональна схеми автоматизації керування мікрокліматом у овочесховищі

На даній функціональній схемі зображено:

- I – Припливна шахта;
- II – Привід повітряної заслінки;
- III – Привід вентилятора припливної шахти;
- IV – Калорифер;
- V – Вентиль;
- VI – Парозволожувач;
- VII – Місце зберігання овочів;
- VIII – Витяжна шахта;
- IX – Привід вентилятора витяжної шахти;

А також такі прилади:

- TE – давач температури;
- ME – давач вологості;
- USA – прилад контролю, вимірювання та сигналізації показань давачів температури, вологості та концентрації CO₂;
- UCI – прилад контролю, вимірювання та виведення показань давачів температури та вологості;
- HS – ручний перемикач;
- H – ручне керування.

РОЗДІЛ 2. ПОБУДОВА ТА ДОСЛІДЖЕННЯ МАТЕМАТИЧНОЇ МОДЕЛІ ОБ'ЄКТА КЕРУВАННЯ

2.1. Розробка і використання математичної моделі ОК

Для того, щоб провести дослідження об'єкту керування, розробляється математична модель. В даному випадку модель мікроклімату в овочесховищі потрібно, що складається з балансових рівнянь тепла в приміщенні та вмісту вологи в повітрі. Теплові потоки в овочесховищі показані на рисунку 2.1. і враховують потоки тепла теплоносія – гарячої води і повітря, з урахуванням тепла вентиляційного повітря, яке впливає також і на вміст вологи в повітрі. Слід враховувати те, що розбризкування вологи і інтенсивна вентиляція практикується для зниження температури повітря в овочесховищі улітку.

Для розрахунку балансу тепла та вологи в овочесховища введемо дані, які його характеризують.

- Маса збереженої картоплі у овочесховищі, $G_k = 600$ тон;
- Питома площа огорожі по відношенню до маси картоплі, $F_0 = 1,2$ м²/т;
- Питомий об'єм сховища по відношенню до маси картоплі, $W_0 = 3,1$ м³/т;
- Частка площі поверхні огорожі для стелі, $S = 0.5$;
- Коефіцієнт теплопередачі стін огорожі сховища, $K_c = 0,47$ Вт/(м² град);
- Коефіцієнт теплопередачі стелі огорожі сховища, $K_s = 0,41$ Вт/(м² град);

- Коефіцієнт тепловіддачі від картоплі до повітря, $\alpha_k = 0,2 \text{ Вт/(м}^2 \text{ град)}$;
- Температура зовнішнього повітря, $t_z = -10 \text{ град С}$;
- Температура повітря на вході сховища після охолодження, $t_v = 4 \text{ град С}$;
- Тепло дихання картоплі, $Q_0 = 10 \text{ Вт/т}$;
- Температурний коефіцієнт тепла дихання, $b = 0,0617 \text{ 1/град}$;
- Питомі витрати повітря для вентиляції картоплі, $V_0 = 70 \text{ м}^3/(\text{т год})$;
- Питома теплоємність повітря, $C_p = 1005 \text{ Дж/(кг град)}$;
- Питома густина повітря, $\rho_p = 1,293 \text{ кг/м}^3$.

Для розрахунку подачі вологи в овочесховища за допомогою паро-контактного зволожувача введемо такі дані:

- Барометричний тиск у сховищі, $P_b = 750 \text{ мм рт. ст.}$;
- Відносна вологість вхідного повітря, $\phi = 0,7$;
- Тиск насиченої пари при температурі t від 0 до 20 град С можна знайти за отриманою формулою в мм. рт. ст.:

$$p_n = 4,5763 + 0,34021 \cdot t + 9,1503 \cdot 10^{-3} \cdot t^2 + 3,1159 \cdot 10^{-4} \cdot t^3 \quad (2.1)$$

Для розрахунку подачі вологи за допомогою зволожувача використаємо дані:

- Частка подачі повітря на зволожувач від загальної, $k_z = 0.5$;
- Середня площа перетину отвору для повітря у зволожувач, $F_o = 2 \text{ м}^2$;
- Площа контакту повітря з водою у зволожувачі, $F_z = 12 \text{ м}^2$;

- Температуру води у зволожувачі беремо на 1 град менше температури повітря, $t_{vo} = t_v - 1$;
- Середня маса картоплини у сховищі, $mk = 0,2$ кг;
- Питома густина картоплі, $\rho_k = 1100$ кг/м³;
- Питома теплоємність картоплі, $C_k = 3475$ Дж/(кг град).

Маючи дані, що характеризують об'єкт, побудуємо структурні схеми балансу тепла та вологи та складемо рівняння балансу.

Тепловий баланс в овочесховищі може бути відображений на рис. 2.1.

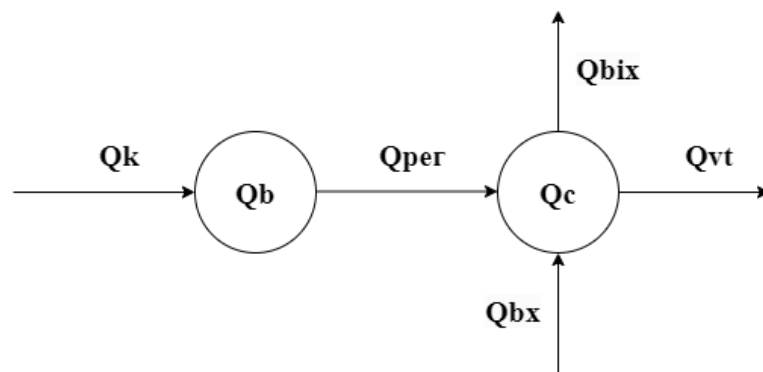


Рис. 2.1. Структурна схема теплового балансу в овочесховищі

Складемо тепловий баланс по теплу картоплі і теплу повітря в овочесховищі:

$$Q_k - Q_{per} = 0, \quad (2.2)$$

$$Q_{per} + Q_{bx} - Q_{bix} - Q_{vt} = 0, \quad (2.3)$$

де Q_k – тепло дихання картоплі, Вт, Q_{per} – тепло, що передається від картоплі до повітря, Q_{bx} , Q_{bix} – тепло що поступає і виходить з вентиляційним повітрям, Q_{vt} – тепло, що втрачається в навколишнє середовище.

Тепло дихання картоплі рахуємо за формулою, Вт:

$$Q_k = Q_0 \cdot e^{b \cdot tc} \cdot Gk \quad (2.4)$$

Тепло, що передається від картоплі до повітря, Вт:

$$Q_{\text{пер}} = \alpha k \cdot Fk \cdot (tk - tc), \quad (2.5)$$

де tk – температура картоплі град С, tc – температура повітря сховища, град С, Fk – площа поверхні картоплі, м², а αk – середній коефіцієнт тепловіддачі від картоплі до повітря, Вт/(м² град)

При середній масі картоплини mk , кг, середній радіус картоплини буде рівний, м:

$$rk = \sqrt[3]{\frac{3 \cdot mk}{4 \cdot \pi \cdot \rho k}}, \quad (2.6)$$

де ρk – питома густина картоплі, кг/м³, а площа всіх бульб в сховищі буде рівною, м²:

$$Fk = 4 \cdot \pi \cdot rk^2 \cdot \frac{Gk \cdot 1000}{mk} \quad (2.7)$$

Тепло, що поступає і виходить з повітрям залежить від продуктивності вентиляційної системи Vb і температури повітря на вході tv і виході tc із сховища.

Температура повітря на вході сховища у теплий період року охолоджується до температури tv і розраховується:

$$Q_{bx} = Vb \cdot Cp \cdot \rho p \cdot tv \quad (2.8)$$

Або такою формулою:

$$Q_{bx} = Vb \cdot Cp \cdot \rho p \cdot tc \quad (2.9)$$

Продуктивність вентиляційної системи знайдемо з урахуванням питомих витрат на вентиляцію з урахуванням маси картоплі, м³/с:

$$Vb = \frac{Gk \cdot V0}{3600} \quad (2.10)$$

Втрати тепла рахуємо з урахуванням поверхні стін і стелі сховища і температури повітря в навколишньому середовищі:

$$Q_{vt} = (Kc \cdot (1 - S) + Ks \cdot S) \cdot Gk \cdot F0 \cdot (tc - tz) \quad (2.11)$$

Для складання рівнянь динаміки зміни тепла в масі картоплі і повітрі сховища порахуємо вміст тепла в картоплі, Вт:

$$Qb = Gk \cdot Ck \cdot 1000 \cdot tk, \quad (2.12)$$

А також вміст тепла в повітрі сховища. Об'єм повітря сховища порахуємо з урахуванням об'єму, що займає картопля, м³:

$$Vc = Gk \cdot W0 - \frac{Gk \cdot 1000}{\rho k} \quad (2.13)$$

Таким чином тепло повітря сховища буде рівним, Вт:

$$Qc = Vc \cdot \rho p \cdot Cp \cdot tc \quad (2.14)$$

Використовуючи рівняння статики і рівняння вмісту і потоків тепла отримаємо рівняння динаміки теплообміну у сховищі по теплу картоплі:

$$\frac{dtk}{d\tau} = \frac{Q0}{Ck} \cdot e^{b \cdot tc} - \frac{ak \cdot Fk \cdot (tk - tc)}{Gk \cdot 1000 \cdot Ck}, \quad (2.15)$$

і теплу повітря сховища:

$$\frac{dtc}{d\tau} = \frac{ak \cdot Fk \cdot (tk - tc)}{Vc \cdot \rho p \cdot Cp} - \frac{Vb}{Vc} \cdot (tv - tc) - \frac{(Kc \cdot (1 - S) + Ks \cdot S)}{Vc \cdot \rho p \cdot Cp} \cdot Gk \cdot F0 \cdot (tc - tz) \quad (2.16)$$

Тепер складемо баланс вологи в овочесховищі (рис.2.2).

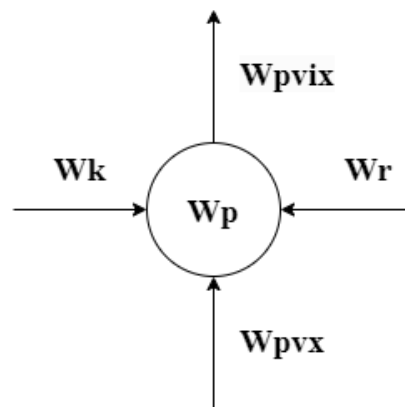


Рис. 2.2. Структурна схема балансу вологи в овочесховищі

На схемі W_k – волога, що поступає від картоплі; W_{pvx} і W_{pvix} – волога, що поступає і видаляється з повітрям W_r – волога, яка, при необхідності, поступає із зволожувача; W_p – волога що є в повітрі овочесховища, кг.

Вміст вологи в повітрі овочесховища визначається об'ємом і характеристиками повітря в сховищі:

$$W_p = Vc \cdot \rho p \cdot x_p, \quad (2.17)$$

де x_p – вміст вологи в повітрі сховища, кг/кг сухого повітря.

Вологовміст вхідного повітря визначається в залежності від відносної вологості повітря ϕ по формулі:

$$xz = 0,622 \cdot \frac{\phi \cdot pn(tz)}{Pb - \phi \cdot pn(tz)}, \quad (2.18)$$

де Pb – барометричний тиск у сховищі, мм рт. ст., tz – температура зовнішнього повітря.

Волога в повітрі на вході і виході із сховища визначається характеристиками зовнішнього повітря і витратами вентиляційного повітря Vb . Волога в повітрі на вході визначається за формулою:

$$Wpvx = Vb \cdot \rho p \cdot xz \quad (2.19)$$

Тоді як на виході буде:

$$Wpvix = Vb \cdot \rho p \cdot xz, \quad (2.20)$$

де xz – вміст вологи в зовнішньому повітрі, кг/кг сухого повітря.

Для визначення вологи, яка поступає від картоплі при диханні, кг/с, скористаймося формулою:

$$Wk = Gk \cdot nk \cdot 10^{-3}, \quad (2.21)$$

де nk – частка від картоплі, що випаровується при диханні. Вона визначається такою формулою:

$$nk = \frac{1,9 \cdot \frac{Qk}{Gk}}{(1525 - 35 \cdot tc) \cdot 100} \quad (2.22)$$

Таким чином динаміка зміни вологи в овочесховищі може бути описана рівнянням:

$$\frac{d(x_p)}{d\tau} = \frac{\frac{G_k}{1000} \cdot \frac{1,9 \cdot Q_0}{(1525 - 35 \cdot t_c) \cdot 100} + V_v \cdot \rho_p \cdot (x_{pz} - x_p) + W_z}{V_p \cdot \rho_p} \quad (2.23)$$

Далі, розглянемо математичну модель для парозволожувача.

З урахуванням прийнятих припущень система рівнянь математичного опису нестационарних режимів парозволожувача може бути записана у наступному вигляді:

$$m_{vn} \frac{dI_2}{d\tau} = G_n \cdot i_n - G_v \cdot (I_2 - I_1) \quad (2.24)$$

$$m_v \frac{dd_2}{d\tau} = G_n \cdot 10^3 - G_v \cdot (d_2 - d_1) \quad (2.25)$$

Де I_2 , d_2 – питома ентальпія і вологовміст повітря на виході із парозволожувача, відповідно в кДж/кг та г/кг_{сп};

m_{vn} – маса повітря (сухого) в об'ємі зволожувача, кг;

G_n – витрати водяної пари, кг/с;

i_n – ентальпія водяної пари $i_n = (I_2 - I_1)/(d_2 - d_1) \cdot 10^3$;

I_1 , d_1 – питома ентальпія і вологовміст повітря на вході в парозволожувач, відповідно в кДж/кг та г/кг_{сп}.

Ентальпія перегрітої водяної пари у насиченому вологому повітрі:

$$i'_n = 2500 + 1,86 \cdot t_n \quad (2.26)$$

де t_n – температура пари, °С.

Система рівнянь (2.24) – (2.25) не є взаємопов'язаною і не враховує перехресні зв'язки, які можна визначити, розкриваючи значення $i(t,d)$ за відомою формулою:

$$i = c_p \cdot t + d \cdot (1,86 \cdot t + 2500) \cdot 10^{-3}. \quad (2.27)$$

У діапазоні незначних змін параметрів t, d ($-2 \dots +2$ °C, $2,5 \dots 3,6$ г/кг_{сп}) вираз (2.27) можна спростити:

$$i(\tau) = c_p \cdot t_v(\tau) + r_0 \cdot d_v(\tau) \cdot 10^{-3}. \quad (2.28)$$

Для визначення взаємозв'язку $t_2 \rightarrow d_1 \rightarrow G_n$ розв'яжемо рівняння (2.24)–(2.25) для сталого режиму ($\frac{di_2}{d\tau} = \frac{dd_2}{d\tau} = 0$) з урахуванням (2.28). Отримаємо залежності:

$$t_{20} = \frac{G_{n0}}{G_{v0}} \cdot \left(\frac{i_n}{a} - \frac{b}{a} \cdot 10^3 \right) + t_{10}, \quad d_{20} = \frac{G_{n0}}{G_{v0}} \cdot 10^3 + d_{10}. \quad (2.29)$$

Таким чином визначено, що величина температури повітря на виході парозволожувача від вологовмісту повітря не залежить.

Диференціюючи рівняння (2.29) за часом і розв'язуючи його відносно t_2 сумісно з рівнянням (2.25), будемо мати диференціальне рівняння, яке визначає перехідний процес зміни температури повітря при додаванні в нього водяної пари:

$$\frac{dt_2(\tau)}{d\tau} = \frac{G_n(\tau)}{m_v \cdot c_p} \cdot (i_n - r_0) - \frac{G_v}{m_v} t_2(\tau) - \frac{G_v}{m_v} t_1; \quad (2.30)$$

або

$$\frac{m_v}{G_n(\tau)} \cdot \frac{dt_2(\tau)}{d\tau} + t_2(\tau) = \frac{G_n(\tau)}{G_v(\tau)} \cdot (i_n - r_0) + t_1. \quad (2.31)$$

Перетворюючи рівняння (2.31) та (2.25) за Лапласом при нульових початкових умовах, отримаємо передавальні функції за керуючими діями по каналах:

– температура повітря на виході парозволожувача – витрати пари

$$W_{n1}(p) = \frac{t_{k1}(p)}{G_n(p)} = \frac{k_{n1}}{T_n \cdot p + 1}, \quad (2.32)$$

– температура повітря на виході парозволожувача – температура повітря на вході парозволожувача

$$W_{n2}(p) = \frac{t_{k1}(p)}{t_{v2}(p)} = \frac{1}{T_n \cdot p + 1}, \quad (2.33)$$

– вологість повітря на виході парозволожувача – витрати пари

$$W_{n3}(p) = \frac{d_{k1}(p)}{G_n(p)} = \frac{k_{n2}}{T_n \cdot p + 1}, \quad (2.34)$$

– вологість повітря на виході парозволожувача – температура повітря на вході парозволожувача

$$W_{n4}(p) = \frac{d_{k1}(p)}{d_{v2}(p)} = \frac{1}{T_n \cdot p + 1}, \quad (2.35)$$

де

$$T_n = \frac{m_{vn}}{G_v}; \quad k_{n1} = \frac{i_n - r_0}{G_v}; \quad k_{n2} = \frac{10^3}{G_v}.$$

Регульованим параметром об'єкта є витрати пари $G_n(\tau)$. Величини $t_{v2}(\tau)$, $d_{v2}(\tau)$, $G_v(\tau)$ є збуреннями, викликаними нарощуванням інею на поверхні повітроохолоджувача (попередня ланка системи підготовки повітря) та відповідно зміщеннями $G_v(\tau)$. Враховуючи, що за умовами технологічного регламенту відношення $\frac{G_n(\tau)}{G_v(\tau)} = d_{\text{зад}} = \text{const}$, величину G_v можна прийняти сталою для певного режиму роботи системи (охолодження, зберігання).

Подача водяної пари в парозволожувач здійснюється від парогенератора з водяним баком і елементами електронагріву (електродний котел) або інфрачервоними нагрівачами.

Характеристики парогенератора-випарника отримано з рівняння теплового балансу:

$$r \cdot dG_n = P_n \cdot d\tau - c_w \cdot m_w \cdot \Delta\theta_w, \quad (2.36)$$

Де:

- c_w – питома теплоємність води у випарнику, кДж/(кг·°С);
- m_w – маса води у випарнику, кг;
- $\Delta\theta_w$ – температура води у випарнику, °С;
- P_n – електрична потужність, кВт.

Другий член правої частини рівняння (2.36) враховує динаміку нагрівання води до температури кипіння. Як правило, парові канали зволожувача (електродного чи елементного типу) вмикають після доведення температури води до значення, близького до кипіння, а далі пари перегрівають до температури 110–116 °С на виході парогенератора.

Тому, якщо температура води нижча за 100 °С на величину $\Delta\theta_w$, додаткового нагрівання можна врахувати величиною чистого запізнювання:

$$\tau = \frac{c_w \cdot m_w \cdot \Delta\theta_w}{P_n}. \quad (2.37)$$

Тоді передатну функцію по каналу паропродуктивність G_n – потужність нагрівача P_n отримаємо у вигляді:

$$W_{ng}(p) = \frac{G_n}{P_n} = k_{n3} \cdot e^{-\tau \cdot p}, \quad (2.38)$$

де $k_{n3} = r_0^{-1}$.

Зволоження повітря холодильної камери шляхом подання водяної пари, яка повністю поглинається повітрям, набуло поширення в промисловості при централізованому постачанні пари.

2.2 Розрахунок даних по математичній моделі

Маючи математичну модель виконаємо розрахунки теплового та вологісного балансу. Для її проведення скористаємося програмним середовищем MathCad.

Вхідні дані:

1. Маса картоплі, тон	$G_k := 600$
2. Питома площа поверхні огорожі, $\text{м}^2/\text{т}$	$F_0 := 1.2$
2а. Частка площі поверхні огорожі для стелі, $\text{м}^2/\text{т}$	$K_s := 0.5$
3. Коефіцієнт теплопередачі стін огорожі, $\text{Вт}/\text{м}^2 \text{ град}$	$K_{0c} := 0.47$
3а. Коефіцієнт теплопередачі стелі огорожі, $\text{Вт}/\text{м}^2 \text{ град}$	$K_{0s} := 0.41$
4. Температура в сховищі, град С	$t_c := 5$
5. Температура зовнішнього повітря, град С	$t_z := 10$
6. Температура вхідного повітря, град С	$t_v := 4$
7. Температурний коефіцієнт, $1/\text{град}$	$b := 0.0617$
8. Тепло дихання, $\text{Вт}/\text{т}$	$Q_0 := 10$
10. Питомі витрати зовнішнього повітря, $\text{м}^3/\text{т год}$	$V_0 := 45$
11. Питома теплоємність повітря, $\text{Дж}/\text{кг град}$	$C_p := 1005$
12. Питома густина повітря, $\text{кг}/\text{м}^3$	$\rho_p := 1.293$

До розрахунку балансу вологи:

1. Барометричний тиск, мм. рт.ст.	$P_b := 750$
2. Тиск насиченої водяної пари при $t = 0-20$ град, мм. рт.ст.	

$$p_n(t) := 4.5763 + 0.34021 \cdot t + 9.1503 \cdot 10^{-3} \cdot t^2 + 3.1159 \cdot 10^{-4} \cdot t^3$$

3. Відносна вологість вхідного повітря	$\phi := 0.7$
4. Частка подачі повітря на зволожувач	$K_Z := 0.5$
5. Середня площа перетину отвору для повітря зволожувача, м^2	$F_o := 2$
6. Площа контакту повітря з водою у зволожувачі	$F_z := 12$
7. Температура води у зволожувачі, град С	$t_{vo} := t_v - 1 \quad t_{vo} = 3$

Рис. 2.3. Вигляд вхідних даних у середовищі Mathcad

Розрахунки:**Баланс тепла:**1. Площа поверхні огорожі, м²

$$F_{ct} := F_0 \cdot G_k$$

$$F_{ct} = 720$$

2. Продуктивність вентилятора, м³/сек

$$V_b := V_0 \cdot G_k \cdot \frac{1}{3600}$$

$$V_b = 7.5$$

3. Тепло втрачене (добавлене) через огорожу, Вт

$$Q_{vt} := \frac{(K_{0c} + K_{0s})}{2} \cdot F_{ct} \cdot (t_c - t_z)$$

$$Q_{vt} = -1.584 \times 10^3$$

4. Тепло дихання картоплі, Вт

$$Q_k := Q_0 \cdot e^{b \cdot t_c} \cdot G_k$$

$$Q_0 \cdot G_k = 6 \times 10^3$$

$$Q_k = 8.168 \times 10^3$$

5. Тепло, що поступає з повітрям, Вт

$$Q_{bx} := C_p \cdot V_b \cdot \rho_p \cdot t_v$$

$$Q_{bx} = 3.898 \times 10^4$$

6. Тепло, що виходить з повітрям, Вт

$$Q_{bix} := C_p \cdot V_b \cdot \rho_p \cdot t_c$$

$$Q_{bix} = 4.873 \times 10^4$$

7. Тепло, що залишається у сховищі (баланс), Вт

$$Q_c := Q_{bx} + Q_k - Q_{vt} - Q_{bix}$$

$$Q_c = 6.302$$

Рис. 2.4. Розрахунок балансу тепла

Таким чином, при наявності системи нагрівання та вентиляції овочесховища, було отримано розрахунки тепла, що поступає з повітрям в приміщення та тепло, що виходить з повітрям. І за рахунок цього розраховано баланс тепла у сховищі.

Баланс влаги:

1. Вологовміст вхідного повітря, кг пари/ кг сухого повітря

$$x_p := 0.622 \cdot \frac{\phi \cdot p_n(t_z)}{P_b - \phi \cdot p_n(t_z)} \quad x_p = 0.0053901$$

2. Вода, що поступає з повітрям в сховище, кг /с

$$W_p := V_b \cdot \rho_p \cdot x_p \quad W_p = 0.052$$

3. Швидкість руху повітря в зволожувачі, м /с

$$V_z := \frac{V_b \cdot K_z}{F_o} \quad V_z = 1.875$$

4. Парціальний тиск водяної пари у повітрі, що над водою зволожувача, мм рт. ст. (Павлов К.Ф.
- $\phi(10.23)$
-)

$$P_p := p_n(t_{vo}) - \left[1 \cdot 10^{-5} \cdot \left(65 + \frac{6.75}{V_z} \right) \right] \cdot (t_v - t_{vo}) \cdot P_b \quad P_p = 5.173$$

5. Вода, що випарена у зволожувачі, кг /с (ф.10.25)

$$p_n(t_v) = 6.103$$

$$W_z := 0.04075 \cdot V_z^{0.8} \cdot (p_n(t_v) - P_p) \cdot \frac{F_z}{3600} \quad W_z = 0.0002089$$

6. Частка від маси картоплі, що випаровується при диханні

$$n_k := \frac{1.9 \cdot \frac{Q_k}{G_k}}{(1525 - 35 \cdot t_c) \cdot 100} \quad n_k = 1.916 \times 10^{-4}$$

7. Вода, яка поступає від картоплі при диханні, кг/с

$$W_k := G_k \cdot n_k \cdot 10^{-3} \quad W_k = 1.15 \times 10^{-4}$$

8. Сумарна волога, кг/с

$$W_s := W_p + W_z + W_k \quad W_s = 0.053$$

$$x_{p1} := \frac{W_s}{V_b \cdot \rho_p} \quad x_{p1} = 5.424 \times 10^{-3}$$

$$\phi_1 := \frac{P_b \cdot x_{p1}}{(0.622 + x_{p1}) \cdot p_n(t_c)} \quad \phi_1 = 0.991$$

Рис. 2.5. Розрахунок балансу вологи

Продуктивність системи вентиляції, м³/с

$$V_v := \frac{50 \cdot G_k}{3600 \cdot 1000} \quad V_v = 41.667$$

Об'єм повітря в картоплесховищі, м³

$$V_p := V_{st} - \frac{G_k}{\rho_k} \quad V_p = 8304.727$$

$$Q_{pid} := G_k \cdot q_k \quad Q_{pid} = 5.7 \times 10^4$$

$$Q_k := G_k \cdot C_k \cdot 10 \quad Q_k = 1.042 \times 10^{11}$$

1. Середній радіус картоплі, м

$$r_k := \sqrt[3]{\frac{3 \cdot m_k}{4 \cdot \pi \cdot \rho_k}} \quad r_k = 0.0351$$

2. Площа поверхні бульб у сховищі, м²

$$S_k := 4 \cdot \pi \cdot r_k^2 \cdot \frac{G_k}{m_k} \quad S_k = 232809$$

$$Q_{per} := K_k \cdot S_k \cdot 5 \quad Q_{per} = 2.484 \times 10^5$$

Рис. 2.6. Розрахунок параметрів системи вентиляції овочесховища

2.3. Побудова та дослідження імітаційної моделі ОК

Визначивши математичну модель та розрахувавши необхідні вхідні дані, будуємо імітаційну модель контролю температури та вологості в овочесховищі, а також динамічних режимів в системі для парозволожувача за допомогою програмного пакету MATLAB Simulink.

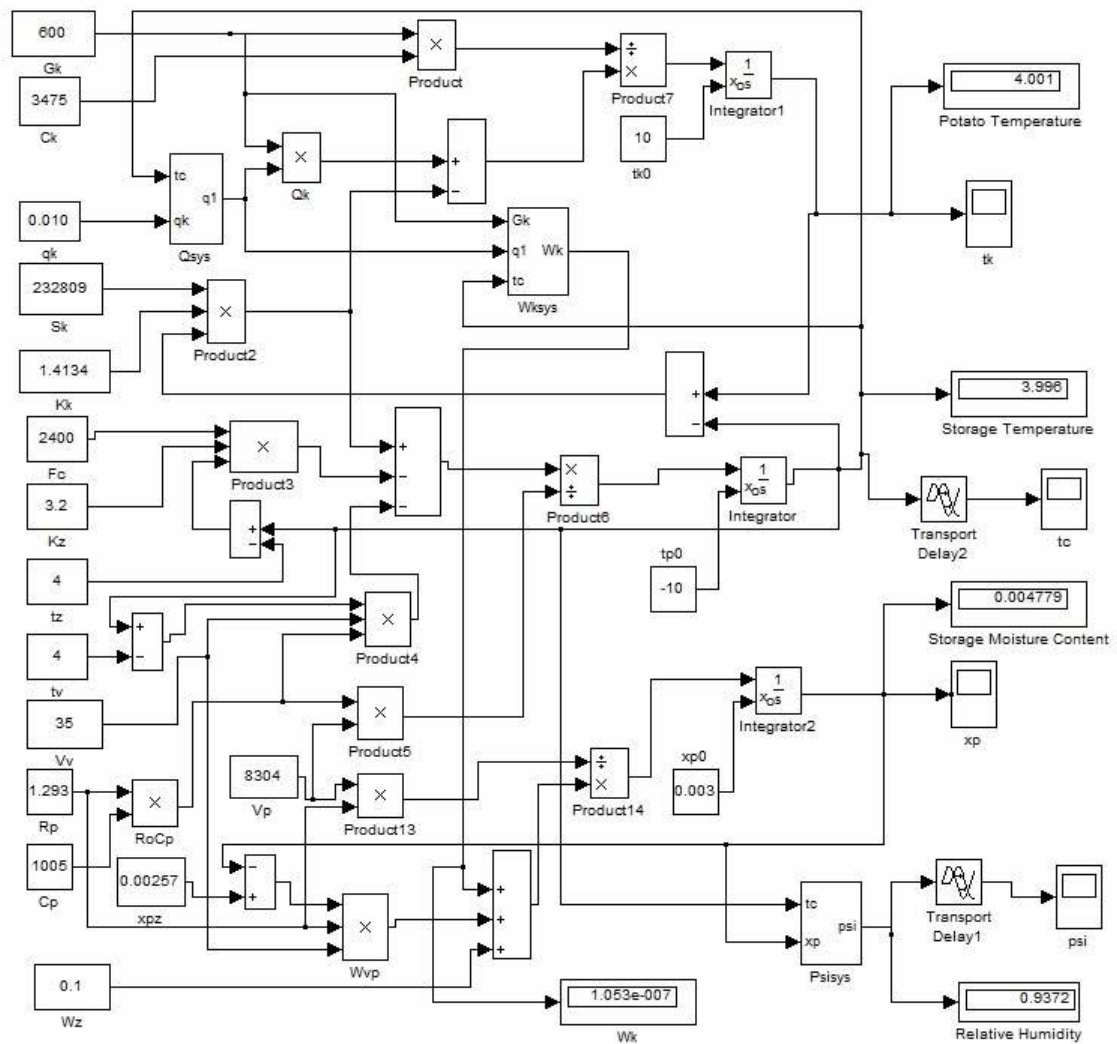


Рис. 2.7. Імітаційна модель контролю температури та вологості в овочесховищі

Дана схема дає можливість отримати потрібні дані температури та вологості, зокрема їх поточні значення при регулюванні за часом.

А також розгінні криві, що показують стабілізацію заданих параметрів мікроклімату за певний період часу. Таким чином можна зімітувати роботу системи маючи математичну модель та потрібні параметри об'єкта.

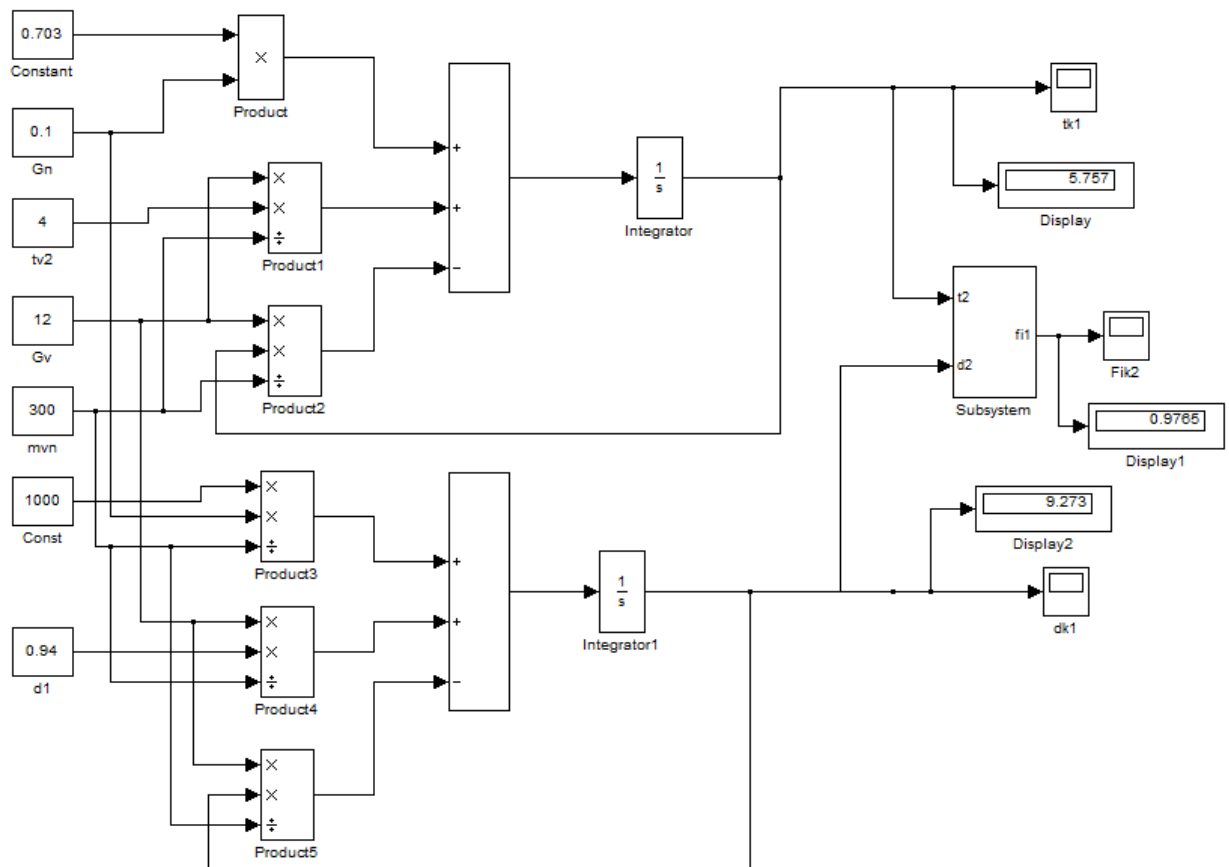


Рис. 2.8. Імітаційна модель динамічних режимів в системі для парозволожувача

Ця схема дає можливість отримати потрібні дані температури та вологості, зокрема їх поточні значення при регулюванні за часом. А також розгінні криві, що показують стабілізацію заданих параметрів мікроклімату за певний період часу. Таким чином можна зімітувати роботу системи маючи математичну модель та потрібні параметри об'єкта.

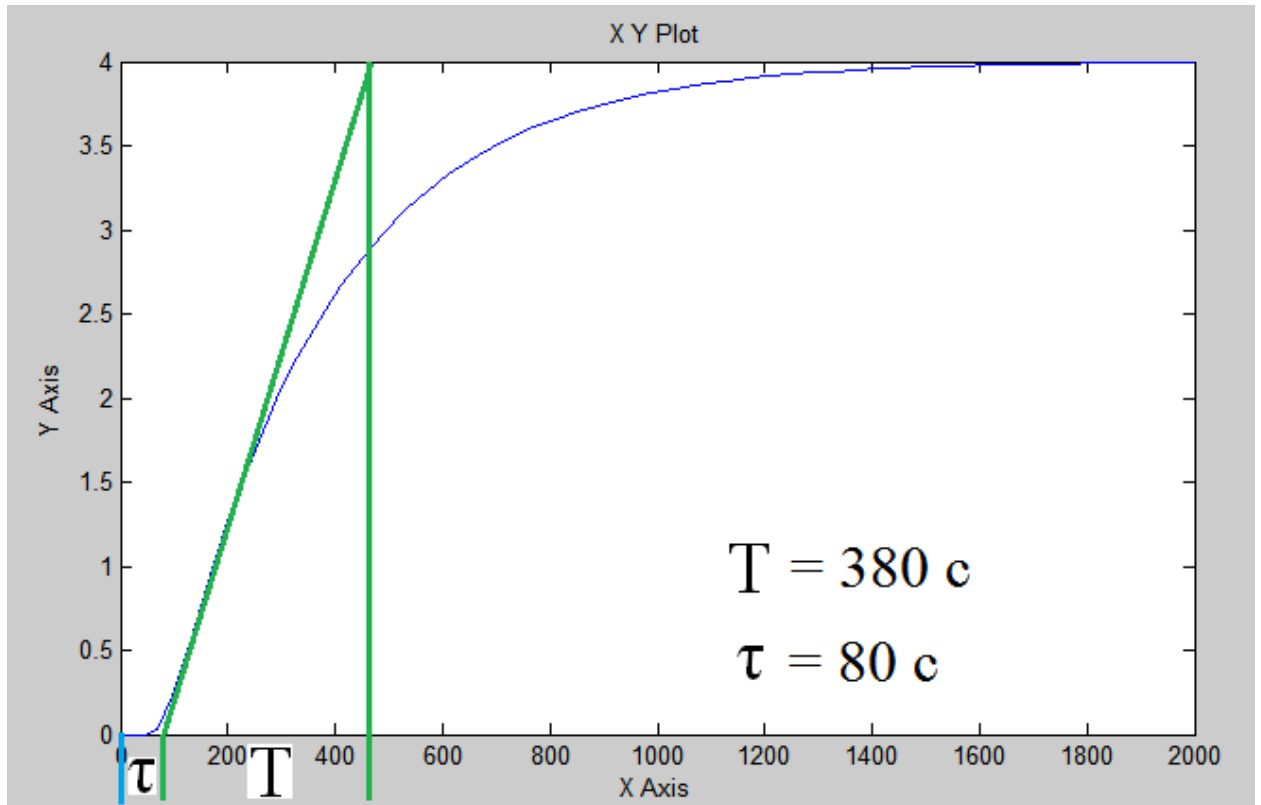


Рис. 2.9. Розгінна крива зміни температури в овочесховищі з додатковим позначенням

З розгінної кривої отримуємо значення: $T_{TE} = 380$ с, $\tau_{TE} = 80$ с.

На основі аналізу імітаційної моделі контролю температури та вологості в овочесховищі, яка демонструє дві розгінні криві зміни температури та вологості в овочесховищі, а також технології, було отримано розгінні криві зміни температури та вологості повітря овочесховищі. І вже за допомогою них можна визначити передатні функції.

Для статичних об'єктів передатна функція матиме вигляд:

$$W(p) = \frac{K_0 \cdot e^{-\tau p}}{T \cdot p + 1}, \quad (2.39)$$

де

- p – оператор Лапласа,
- K_0 – коефіцієнт підсилення об'єкта,
- T – постійна часу,

– τ – час запізнення.

З отриманої розгінної кривої зміни температури можна визначити, що постійна часу $T = 380$ с, а час запізнення $\tau = 80$ с.

Коефіцієнт підсилення об'єкта K_0 визначаємо по формулі:

$$K_0 = \frac{\Delta y}{\Delta x}, \quad (2.40)$$

де Δx – це робоча потужність виконавчого механізму для контролю температурного режиму, кВт а Δy – різниця зміни температури, °С.

Для того, щоб визначити Δy , візьмемо дві окремі близькі точки на графіку по осі Y та визначимо їх різницю. У цьому випадку обираємо значення 2 та 0, різниця яких буде дорівнювати 2, тобто:

$$\Delta y = 2 - 0 = 2 \quad (2.41)$$

При цьому, Δx визначається як різниця часу зміни температури між 2 точками:

$$\Delta x = 460 - 320 = 140. \quad (2.42)$$

З цього, визначимо коефіцієнт підсилення об'єкта K_0 для температурного режиму:

$$K = \frac{2}{140} = 0,0143. \quad (2.43)$$

Отже, передатна функція каналу регулювання температури в овочесховищі матиме вигляд:

$$W_T(p) = \frac{0,0143 \cdot e^{-80p}}{380 \cdot p + 1}. \quad (2.44)$$

Аналогічно визначимо передатну функцію вологості повітря овочесховищі по розгінній кривій (рис. 2.10).

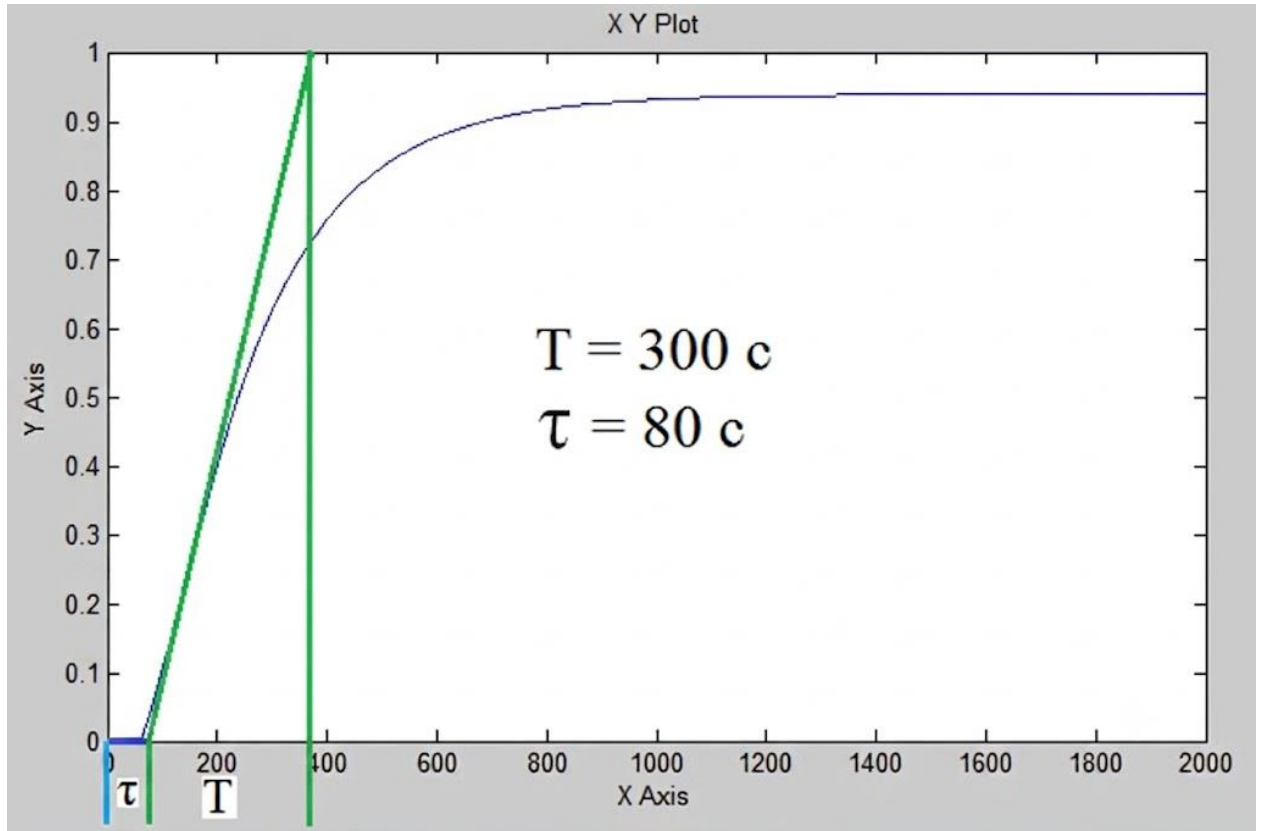


Рис. 2.10. Розгінна крива зміни вологості повітря в овочесховищі з додатковим позначенням

З розгінної кривої отримуємо значення: $T_{\text{вол}} = 380$ с, $\tau_{\text{вол}} = 80$ с.

Обираємо значення 0.7 та 0.6, різниця яких буде дорівнювати 2, тобто:

$$\Delta y = 0.7 - 0.6 = 0.1 \quad (2.45)$$

При цьому, Δx визначається як різниця часу зміни вологості між 2 точками:

$$\Delta x = 270 - 210 = 60. \quad (2.46)$$

З цього, визначимо коефіцієнт підсилення об'єкта K_0 для температурного режиму:

$$K = \frac{0,1}{60} = 0,00167. \quad (2.47)$$

Отже, передатна функція каналу регулювання вологості повітря в овочесховищі матиме вигляд:

$$W_d(p) = \frac{0,00167 \cdot e^{-80p}}{300 \cdot p + 1}. \quad (2.48)$$

Тепер, отримаємо розгінні криві імітаційної моделі динамічних режимів в системі для парозволожувача та визначимо до них передатні функції.

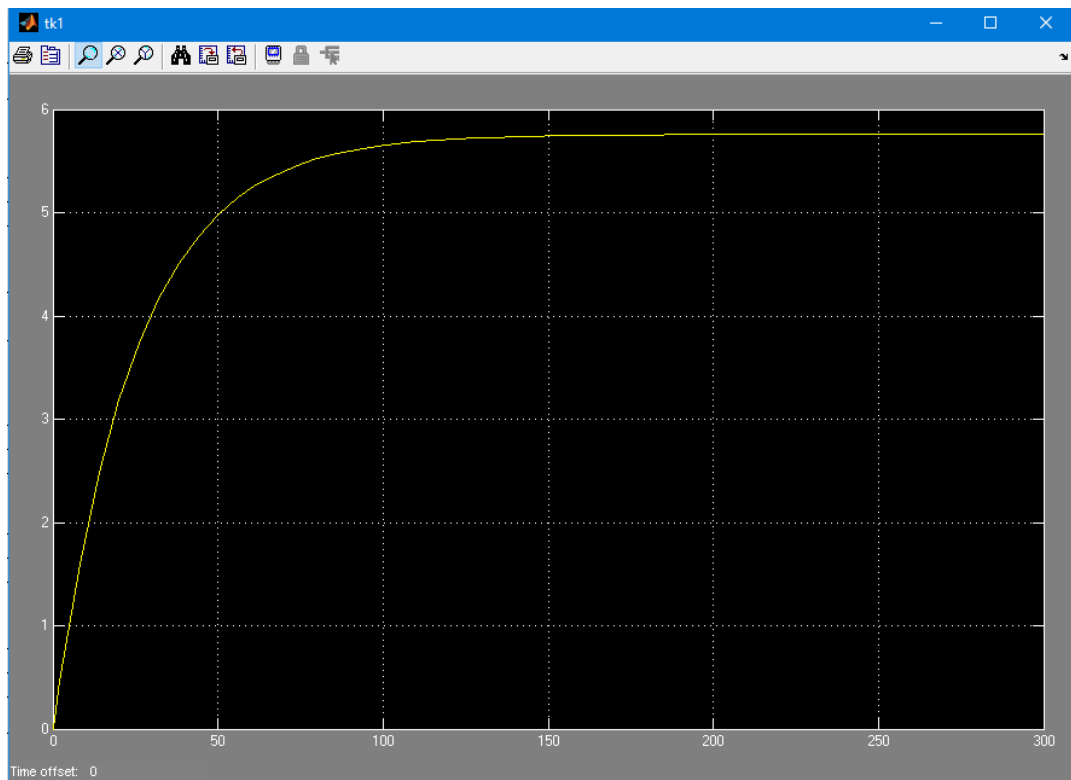


Рис. 2.11. Перехідний процес в парозволожувачі по температурі повітря на виході

Отримавши розгінну криву, переходимо до визначення передатної функції зміни температури повітря на виході парозволожувача. Як ми отримали вище:

$$W_{PT}(p) = \frac{k_T}{T \cdot p + 1}, \quad (2.49)$$

де

$$k_T(p) = \frac{\Delta t_2}{\Delta G_v}, \quad T = \frac{m_v}{G_v} \quad (2.50)$$

Знайдемо передатну функцію обчисливши необхідні коефіцієнти:

$$\Delta t_2 = t_{k1} - t_{v2} = 5.757 - 4 = 1.757,$$

$$\Delta G_v = G_v - G_n = 12 - 0.1 = 11.9,$$

$$k_t = \frac{1.757}{11.9} = 0.1476,$$

$$T = \frac{m_v}{G_v} = \frac{300}{12} = 25 \text{ с.}$$

Маючи усі необхідні коефіцієнти, підставимо їх у формулу (2.49) і отримаємо передатну функцію температури повітря в парозволожувачі:

$$W_{PT}(p) = \frac{0,1476}{25 \cdot p + 1}, \quad (2.51)$$

Аналогічно знайдемо передатну функцію і для вологості.

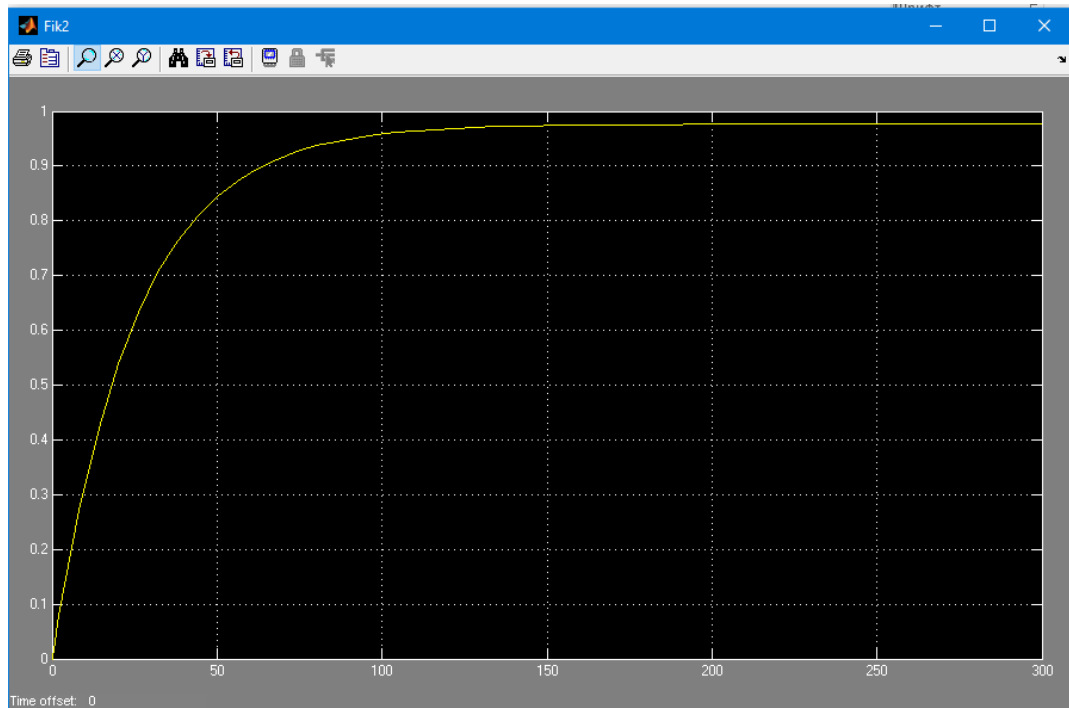


Рис. 2.11. Перехідний процес в парозволожувачі по вологості повітря на виході

Отримавши перехідний процес в парозволожувачі по вологості повітря, визначаємо передатну функцію:

$$W_{Pd}(p) = \frac{k_d}{T \cdot p + 1}, \quad (2.52)$$

де

$$k_d(p) = \frac{\Delta d_2}{\Delta G_v}, \quad T = \frac{m_v}{G_v} \quad (2.53)$$

Обчислюємо необхідні коефіцієнти:

$$\Delta d_2 = d_2 - d_1 = 0.9765 - 0.94 = 0.0365,$$

$$\Delta G_v = 11.9,$$

$$k_d = \frac{0.0365}{11.9} = 0.00307,$$

$$T = 25 \text{ с.}$$

І отримуємо передатну функцію вологовмісту в парозволожувачі:

$$W_{Pd}(p) = \frac{0,00307}{25 \cdot p + 1}, \quad (2.54)$$

Отже, у результаті імітаційного моделювання було отримано 4 передатні функції, а саме:

- По каналу температури повітря в овочесховищі: $W_T(p) = \frac{0,0143 \cdot e^{-80p}}{380 \cdot p + 1},$
- По каналу вологості повітря в овочесховищі: $W_d(p) = \frac{0,00167 \cdot e^{-80p}}{300 \cdot p + 1},$
- По каналу температури повітря в парозволожувачі: $W_{PT}(p) = \frac{0,1476}{25 \cdot p + 1},$
- По каналу вологості повітря в парозволожувачі: $W_{Pd}(p) = \frac{0,00307}{25 \cdot p + 1}.$

2.4. Визначення оптимального управління методом динамічного програмування

Нехай математична модель об'єкта управління має вигляд:

$$\begin{cases} \frac{dx_1}{dt} = x_2, \\ \frac{dx_2}{dt} = a_1 \cdot x_1 + a_2 \cdot x_2 + U. \end{cases}$$

Використаємо критерій оптимальності у вигляді:

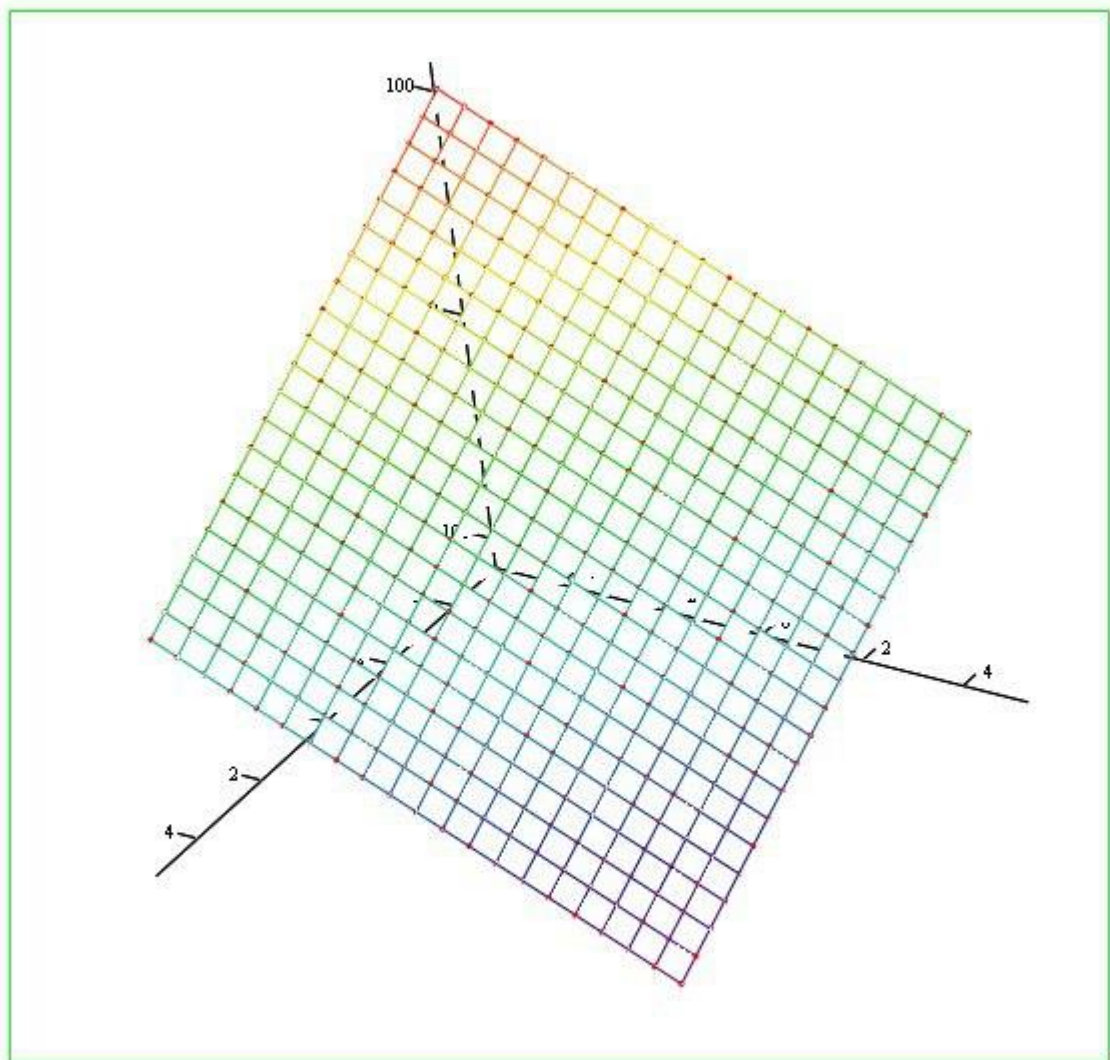
$$I(U) = \int_0^{\infty} V dt = \int_0^{\infty} (q_1 \cdot x_1^2 + q_2 \cdot x_2^2 + U^2) dt.,$$

Потрібно визначити закон зміни $U(x_1, x_2) = f(x_1, x_2)$.

Опираючись на дані з попередньої задачі, визначимо оптимальне управління на основі використання методу динамічного програмування у середовищі MathCad.

$$\begin{aligned} a1 &:= 5.6 \\ a2 &:= 3.4 \\ q1 &:= 5 \\ q2 &:= 5 \\ A12 &:= 2 \cdot a1 + 2 \cdot \sqrt{a1^2 + q1} = 23.26 \\ A22 &:= a2 + \sqrt{a2^2 + q2 + A12} = 9.71 \\ x1 &:= 10, 11..20 \\ x2 &:= 0, 1..10 \\ U(x1, x2) &:= \frac{-A12}{2} \cdot x1 - A22 \cdot x2 \end{aligned}$$

Рис.2.12. Розрахунок оптимального управління системи



U

Рис.2.13. Графік оптимального управління $U(x_1, x_2) = f(x_1, x_2)$

З отриманого графіку оптимального управління видно, що чим вища температура (x_1), тим сильніше потрібне негативне (охолоджувальне) керування. Так само, чим вища вологість (x_2), тим більше компенсуюче керування необхідно для стабілізації. На основі цього методу можна здобути розв'язок оптимального управління у замкненій формі, тобто у вигляді $U=f(x_i)$, що є його перевагою.

РОЗДІЛ 3. СИНТЕЗ ТА АНАЛІЗ СИСТЕМИ АВТОМАТИЧНОГО КЕРУВАННЯ

3.1. Вибір алгоритму керування

Вибір алгоритму керування може здійснюватися ще на етапі проектування системи на основі аналізу динамічних характеристик об'єкта керування. Одним із визначальних критеріїв є співвідношення між сталою часу об'єкта та часом його запізнення. Зокрема, якщо виконується умова $0,2 \leq \tau / T \leq 1$, доцільно застосовувати лінійні алгоритми керування. У разі, коли $\tau / T > 1$, рекомендується використання імпульсних алгоритмів, а при $\tau / T < 0,2$ - позиційних.

У межах даної роботи розглядаються два канали керування: температури та вологості повітря в овочесховищі. Внутрішні підсистеми, такі як зволожувач є частиною об'єкту керування, тому для них вибір регулятора не проводиться.

Для каналу температури передатна функція має вигляд:

$$W_T(p) = \frac{0,0143 \cdot e^{-80p}}{380 \cdot p + 1}. \quad (3.1)$$

Визначимо відношення:

$$\frac{\tau_T}{T_T} = \frac{80}{380} \approx 0,21 \quad (3.2)$$

Отримане значення знаходиться поблизу граничного значення 0,2, що свідчить про можливість використання як позиційного, так і лінійного алгоритму.

Проте, з урахуванням вимоги відсутності статичної похибки, позиційний закон керування не може бути застосований, тому обирається лінійний алгоритм.

Для каналу вологості передатна функція має вигляд:

$$W_d(p) = \frac{0,00167 \cdot e^{-80p}}{300 \cdot p + 1}. \quad (3.3)$$

Розрахуємо відповідне співвідношення:

$$\frac{\tau_d}{T_d} = \frac{80}{300} \approx 0,267 \quad (3.4)$$

Оскільки отримане значення задовольняє умову застосування лінійних алгоритмів, для даного каналу також обирається лінійний закон керування.

Таким чином, для обох каналів керування доцільним є використання лінійних алгоритмів.

На наступному етапі необхідно визначити тип перехідного процесу, який забезпечить належну якість регулювання. Розглядаються три типові варіанти: аперіодичний процес, процес із 20%-им перерегулюванням та процес з мінімальним інтегральним показником якості (рис. 3.1).

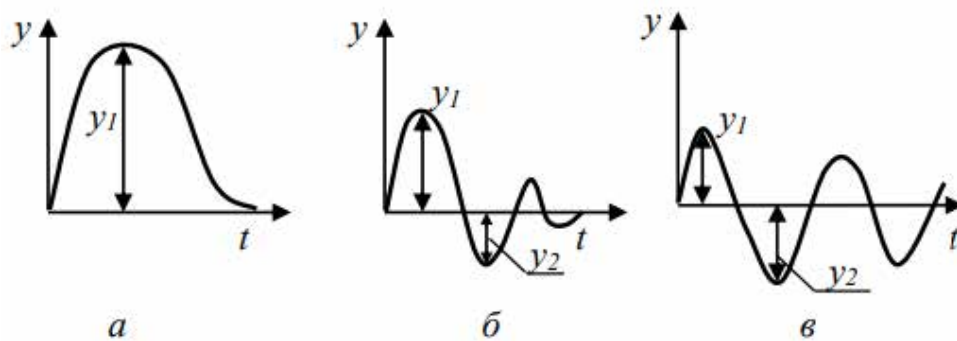


Рис. 3.1. Типові перехідні процеси в САК: а – аперіодичний; б – з 20%-им перерегулюванням; в – з мінімальним інтегральним показником якості.

Аперіодичний процес характеризується відсутністю перерегулювання, проте має значне динамічне відхилення. Перехідний процес із 20%-им перерегулюванням є компромісним варіантом між швидкодією та точністю. Процес із мінімальним інтегральним критерієм якості забезпечує мінімальну сумарну похибку, але може мати складнішу динаміку.

З урахуванням вимог технологічного процесу обирається перехідний процес із допустимим перерегулюванням 20%.

Для обґрунтування вибору алгоритму керування визначається динамічний коефіцієнт регулювання. Оскільки об'єкт є статичним, використовується вираз:

$$R_d = y_1 / (K_0 \cdot y_{\text{макс}}), \quad (3.5)$$

де: y_1 - максимальне динамічне відхилення; K_0 - коефіцієнт передачі системи; $y_{\text{макс}}$ - максимально можливе значення збурення по навантаженню (у відсотках від переміщення регулюючого органу).

Тому, для каналу температури динамічний коефіцієнт регулювання матиме вигляд:

$$R_d = 0,05 / (0,02 \cdot 3) = 0,833. \quad (3.6)$$

І для каналу вологості:

$$R_d = 0,05 / (0,02 \cdot 3) = 0,833. \quad (3.7)$$

Подальший вибір алгоритму керування здійснюється за графічними залежностями динамічного коефіцієнта від параметрів об'єкта (рис. 3.2).

Зазначені значення знаходяться в діапазоні, характерному для об'єктів із підвищеною інерційністю, для яких доцільним є застосування пропорційно-інтегрально-диференційного (ПІД) алгоритму керування.

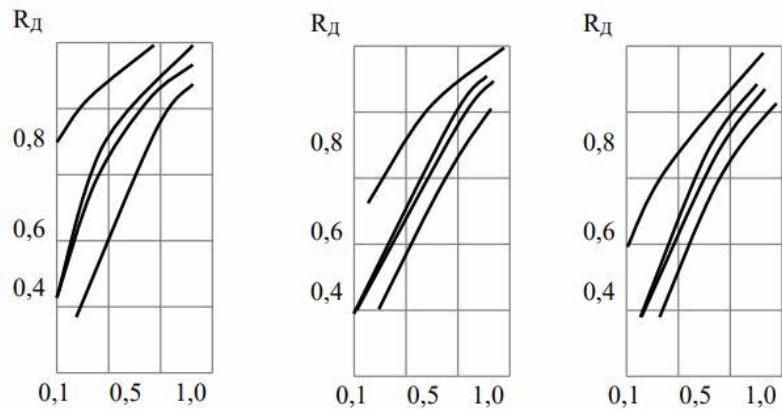


Рис. 3.2. Залежність динамічного коефіцієнта регулювання від динамічних властивостей об'єкта керування: а - для типового аперіодичного перехідного процесу; б - для коефіцієнта передачі об'єкта типового перехідного процесу з 20 %-вим перерегулюванням; в - для типового перехідного процесу з мінімальним інтегральним показником якості; 1–П–алгоритм керування, 2–І–алгоритм керування; 3–ПІ–алгоритм керування; 4–ПІД–алгоритм керування

З урахуванням графічних залежностей та вимог до якості перехідного процесу для обох каналів (температури та вологості) обрано ПІД-регулятори, які забезпечують необхідну швидкодію, відсутність статичної похибки та допустиме перерегулювання.

Таблиця 3.1

Відносний час регулювання

Алгоритм керування	Об'єкт	Відносний час регулювання		
		Аперіодичний	Із 20%-ним перерегулюванням	Із мінімальним інтегральним критерієм
Пропорційний	Статичний	4,5	6,5	9,0
	Астатичний	6,0	8,0	–
Пропорційно–інтегральний	Статичний	8,0	12,0	16,0
	Астатичний	14,0	16,0	18,0
Пропорційно–інтегрально–диференційний	Статичний	5,5	7,0	10,0
	Астатичний	9,0	12,0	13,0

Для того, щоб переконатись у правильності вибору алгоритму керування, потрібно розрахувати час регулювання за формулою 3.8:

$$t = \psi \cdot \tau, \quad (3.8)$$

де ψ – відносний час регулювання, що вибирається з таблиці 3.1, поданій вище.

Так як для обох каналів керування (температури та вологості) час запізнення має однакове значення $\tau=80$ с і враховуючи, що для обох контурів обрано ПД-регулятор та перехідний процес із 20%-им перерегулюванням, відносний час регулювання становить $\psi=7$.

Тому, визначимо час регулювання:

$$t = 7 \cdot 80 = 420 \text{ (с)}. \quad (3.9)$$

Так як $t > T$, тобто $560 > 380$ та $560 > 300$, то можна стверджувати, що алгоритми керування для обох контурів вибрано правильно.

3.2. Вибір технічних засобів

Вибір технічних засобів автоматизації здійснюється з урахуванням параметрів технологічного процесу, діапазонів вимірювання контрольованих величин, сумісності обладнання із засобами керування та динамічних характеристик елементів системи.

Під час вибору датчиків необхідно забезпечити, щоб межі їх вимірювання відповідали діапазонам зміни контрольованих параметрів і були максимально наближені до робочих значень. Також важливо враховувати можливість підключення датчиків до регулятора та їх швидкодію.

Для контролю температури та вологості повітря в овочесховищі доцільно використовувати комбіновані датчики температури і вологості, що дозволяють одночасно контролювати основні параметри мікроклімату.

У даній роботі обрано промисловий датчик температури та вологості ПВТ100, який призначений для роботи в неагресивних середовищах та забезпечує вимірювання параметрів у необхідних технологічних межах.



Рис. 3.3. Промисловий датчик вологості та температури ПВТ100

Таблиця 3.2

Технічні характеристики ПВТ100

Назва ПВП	ПВТ100
Діапазон температури, °C	-35...+80
Показник інерції, с	10...15
Опір при 0 °C (градування), Ом	50
Напруга живлення, В (постійного струму)	24
Споживча потужність, Вт	1,1
Діапазони вимірювання відносної вологості RH, %	0...100
Ступінь захисту	IP65
Межа допустимої абсолютної похибки вимірювання температури при +25 °C, °C	±0,4
Межа максимально допустимої абсолютної похибки вимірювання вологості при +25 °C, %	±3,0
Робочий тиск, МПа	0,084...0,1067

Визначимо коефіцієнт перетворення давача температури та вологості ПВТ100. Для цього, звернемо увагу на ці параметри

- температура, Y_T : 0...50 °С (при переналаштуванні давача);
- вологість, Y_M : 0...100 %
- вихід, X : 4...20 мА

Для давачів із уніфікованим струмовим виходом (4–20 мА) коефіцієнт перетворення визначається як відношення зміни вихідного сигналу до зміни вимірюваної величини:

$$K_{CE} = \frac{Y_{max} - Y_{min}}{X_{max} - X_{min}} \quad (3.10)$$

Для каналу температури:

$$K_{TCE} = \frac{20 - 4}{50 - 0} = 0,32 \quad (3.11)$$

Для каналу вологості:

$$K_{MCE} = \frac{20 - 4}{100 - 0} = 0,16 \quad (3.12)$$

Тоді, передаточні функції давачів матимуть вигляд:

$$W_{TCE} = \frac{0,32}{15 \cdot p + 1}, \quad (3.13)$$

$$W_{MCE} = \frac{0,16}{15 \cdot p + 1}, \quad (3.14)$$

де T — стала часу давача, яким є показник інерції, вказаний у паспортних даних.

Обраний давач забезпечує достатню точність вимірювання температури та вологості, що дозволяє ефективно використовувати його в системі автоматичного керування мікрокліматом овочесховища.

Для реалізації автоматичного регулювання мікроклімату необхідно також обрати виконавчі та регулювальні органи. У даній системі до виконавчого пристрою входять вентилятор, повітряна заслінка, електродвигуни та нагрівальні елементи (калорифери).

У якості приводу вентиляційної системи обрано електродвигун АІР80А2, який широко використовується в автоматизованих сільськогосподарських установках завдяки своїй надійності та простоті експлуатації.



Рис. 3.4. Трьохфазний промисловий асинхронний електродвигун з короткозамкненим ротором АІР80А2

АІР80А2 – це трифазний асинхронний електродвигун 1,5 кВт 3000 об/хв із короткозамкненим ротором, що випускається в Україні. Даний двигун живиться від мереж змінного струму частотою 50 Гц з напругою 380 або 220 Вольт при підключенні через конденсатор. Електродвигун АІР80А2 застосовується для приводу механічного промислового обладнання – редукторів, кранів, малопотужних вентиляторів, подрібнювачів, пилок, верстатів, насосів, дровоколів, компресорів, дробарок.

Таблиця 3.3

Технічні характеристики AIP80A2

Назва двигуна	AIP80A2
Потужність, кВт	1,5
Частота обертання поля статора, об/хв	3000
Фактична частота обертання валу, об/хв	2850
Тип	Асинхронний
Напруга живлення, В	Трифазне, 220/380
Частота, Гц	50
Номінальний струм, А	3,46
Максимальний крутний момент, Нм	12,932
Ступінь захисту	IP55
Момент інерції, кг·м ²	0,0011
Діаметр валу, мм	22
Співвідношення моментів струму Мп/Мн	2,2
Співвідношення моменту сили Мmax/Мн	2,3
Відношення струму Іп/Ін	7,0
Вага, кг	18

Як регулювальний орган вентиляційного каналу використано осьовий вентилятор ВО 06-300-4, що призначений для роботи в системах вентиляції та видалення повітряних мас при температурах до +50°C. Вибір даного вентилятора обґрунтований його сумісністю з електродвигуном AIP80A2 та відповідністю необхідним аеродинамічним характеристикам.



Рис. 3.5. Вентилятор осьовий BO 06-300-4

Таблиця 3.4

Технічні характеристики BO 06-300-4

Назва вентилятора	BO 06-300-4
Потужність, кВт	1,5
Частота обертання поля статора, об/хв	1500
Продуктивність, м³/год	7000
Напруга живлення, В	Трифазне, 380
Тиск, Па	300
Довжина, мм	350
Ширина, мм	460
Висота, мм	460
Вага, кг	23,4
Ступінь захисту	IP54
Температура середовища, °С	робочого -40...+40

Для керування потоками повітря в повітропроводах обрано повітряну заслінку Вентс КРВ 450, яка забезпечує автоматичне перекриття та регулювання подачі повітря у вентиляційних каналах круглого перерізу.



Рис. 3.6. Повітряна заслінка Вентс КРВ 450

Таблиця 3.5

Технічні характеристики КРВ 450

Модель	КРВ 450
Діаметр повітропроводу, мм	450
Ширина, мм	240
Максимальний потік повітря, м ³ /год	8000
Конструкція	регульовані
Повітропровід	круглий
Вага, кг	3,78
Матеріал виробу	метал

Керування заслінкою буде приводитися виконавчим механізмом, а саме приводом Belimo NF230A.



Рис. 3.7. Привід Belimo NF230A

Таблиця 3.6

Технічні характеристики Belimo NF230A

Назва механізму	Belimo NF230A
Номінальний момент на вихідному валу, Н*м	10
Номінальний час повного ходу вихідного валу, с	75
Номінальний повний хід вихідного валу, обороту	0,25
Споживана потужність, Вт	6
Напруга живлення, В	230
Ступінь захисту	IP54
Вага, кг	2

Обраний електропривід Belimo NF230A є моноблочним пристроєм, що поєднує в собі однофазний електродвигун живленням 230 В та систему аварійного зворотного ходу (механічну пружину). Пристрій призначений для безпосереднього встановлення на вал повітряної заслінки Вентс КРВ 450.

Для додаткового регулювання температурного режиму, зокрема підігріву припливного повітря в холодний період року, у системі передбачено встановлення каналного електричного нагрівача Турбовент ЕКА 400-24,0-3f.



Рис. 3.8. Нагрівач електричний круглий Турбовент ЕКА 400-24,0-3f

Таблиця 3.7

Технічні характеристики ЕКА 400-24,0-3f

Назва моделі	ЕКА 400-24,0-3f
Потужність, кВт	24
Споживаний струм, А	35
Мінімальна продуктивність, м ³ /год	690
Максимальна продуктивність, м ³ /год	4000
Напруга живлення, В	Трифазне, 380
Довжина, мм	880
Ширина, мм	400
Висота, мм	481
Нагрівальний елемент	Нержавіюча сталь

Для підтримки заданого рівня вологості у приміщенні овочесховища до складу системи введено ультразвуковий зволожувач повітря Celsius HD-30, що забезпечує ефективне підвищення вологості шляхом генерації дрібнодисперсного водяного аерозолі.



Рис. 3.9. Ультразвуковий зволожувач повітря Celsius HD-30

Таблиця 3.8

Технічні характеристики Celsius HD-30

Назва моделі	Celsius HD-30
Потужність, кВт	3
Споживаний струм, А	13,5
Продуктивність зволоження, л/год	30
Розхід повітря, м³/год	600
Напруга живлення, В	Трифазне, 220
Довжина, мм	700
Ширина, мм	650
Висота, мм	640
Дальність викидання струменя туману, м	3,5
Ступінь захисту	IP54
Вага, кг	90

Для керування подачею води до зволожувача у системі передбачено використання кульового крана з електроприводом 2Е-НС220В-1/2. Даний пристрій виконує функцію регулювального органу та забезпечує відкривання або перекривання потоку робочого середовища відповідно до сигналів від системи керування.



Рис. 3.10. Кульовий кран з електроприводом 2Е-НС220В-1/2

Таблиця 3.9

Технічні характеристики НС 2Е-НС220В-1/2

Назва моделі	НС 2Е-НС220В-1/2
Діаметр труби, дюйм	1/2
Номінальний робочий тиск, бар	10
Максимальний тиск, бар	16
Потужність, Вт	12
Споживаний струм, А	0,05
Крутний момент, Н * м	2
Напруга живлення, В	Трифазне, 220
Час спрацьовування, с	7
Пропускна здатність, м ³ /год	2,5
Максимальна температура циркуляційної рідини, °С	100

Продовження таблиці 3.9

Діапазон температури навколишнього середовища, °С	-20...+45
Ступінь захисту	IP67
Вага, кг	0,34

Електропривід дозволяє здійснювати автоматизоване керування, що є необхідною умовою для інтеграції у систему автоматичного регулювання.

3.3 Визначення передатної функції

Для побудови структурної алгоритмічної схеми системи автоматичного регулювання необхідно визначити передатну функцію виконавчого пристрою, до складу якого входять виконавчі механізми та регульовальні органи системи.

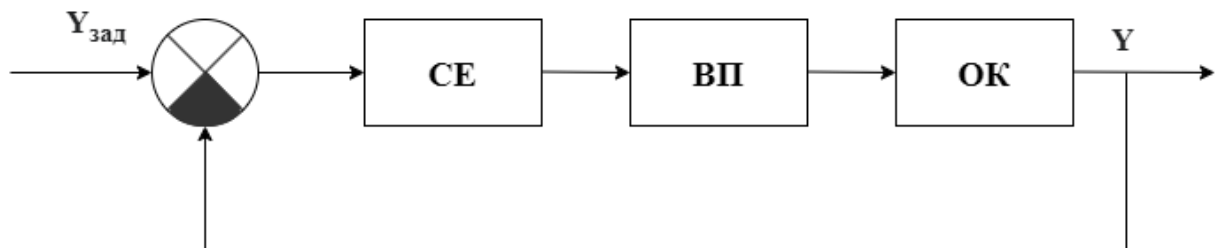


Рис. 3.11. Функціональна схема системи автоматичного регулювання без регулятора

Передатна функція виконавчого пристрою може бути представлена аперіодичною ланкою першого порядку:

$$W_{ВП}(p) = \frac{k_{ВП}}{T_{ВП} \cdot p + 1} \quad (3.15)$$

Для розрахунку коефіцієнт передачі регулюючого органу, матимемо такий вираз:

$$k_{PO}(p) = k_B + k_3, \quad (3.16)$$

де k_B – коефіцієнт передачі вентилятора; k_3 – коефіцієнт передачі повітряної заслінки.

Коефіцієнт передачі вентилятора буде визначатися за формулою:

$$k_B = \frac{A}{P}, \quad (3.17)$$

де A – продуктивність; P – потужність.

Тоді як коефіцієнт передачі заслінки матиме вигляд:

$$k_3 = \frac{N}{D \cdot 60}, \quad (3.18)$$

де N – максимальний потік повітря; D – діаметр повітропроводу з відкритою заслінкою.

Для початку визначимо передатну функцію ВП контуру температури.

Виходячи з цього, визначаємо передатну функцію вентилятора:

$$k_B = \frac{14000}{1500 \cdot 60} = 0,156 \quad (3.19)$$

А також передатну функцію повітряної заслінки:

$$k_3 = \frac{8000}{450 \cdot 60} = 0,296 \quad (3.20)$$

З виразу (3.16) отримуємо передатну функцію регулюючого органу:

$$W_{PO}(p) = 0,156 + 0,296 = 0,452 \quad (3.21)$$

Тепер необхідно визначити коефіцієнт передачі виконавчих механізмів. Для цього візьмемо співвідношення номінальної частоти обертання до номінальної напруги:

$$k_{BM} = k_{AD} + k_{CD} \quad (3.22)$$

де k_{AD} – коефіцієнт передачі АИР80В4; k_{CD} – коефіцієнт передачі МЭО-100/63.

З виразу (3.22) знаходимо коефіцієнти передачі до виконавчих механізмів:

$$k_{AD} = k_{CD} = \frac{W_H}{U_H}, \quad (3.23)$$

З формули (3.18) для AIP80A2 отримуємо:

$$k_{AD} = \frac{3000}{380} = 7,89, \quad (3.24)$$

А також для МЕО-100/25:

$$k_{CD} = \frac{60}{380} = 0,16, \quad (3.25)$$

І отримуємо коефіцієнт передачі виконавчого механізму:

$$k_{BM} = 7,89 + 0,16 = 8,05 \quad (3.26)$$

Маючи коефіцієнт передачі виконавчого механізму та передатну функцію регулюючого органу, знайдемо коефіцієнт передачі виконавчого пристрою перемноживши їх:

$$k_{BPT} = k_{BM} \cdot k_{PO} = 8,05 \cdot 0,452 = 3,64 \quad (3.27)$$

Останнім кроком до визначення передатної функції виконавчого пристрою є визначення постійної часу виконавчого пристрою за цим виразом:

$$T_{BP} = \frac{V_p}{\theta}, \quad (3.28)$$

де θ – продуктивність електрокалорифера по повітрю, м³/год; V_p – об'єм овочесховища, м³.

З виразу (3.23) матимемо:

$$T_{ВП} = \frac{V_p}{\theta} = \frac{7200}{4000} \cdot 60 = 108 \text{ с.} \quad (3.29)$$

Маючи усі необхідні параметри, передатна функція виконавчого пристрою контуру температури матиме вигляд:

$$W_{ВП}(p) = \frac{3,64}{108 \cdot s + 1}$$

Маючи необхідні передатні функції елементів, на базі функціональної схеми будуюмо структурну алгоритмічну схему системи автоматичного регулювання по контуру температури.

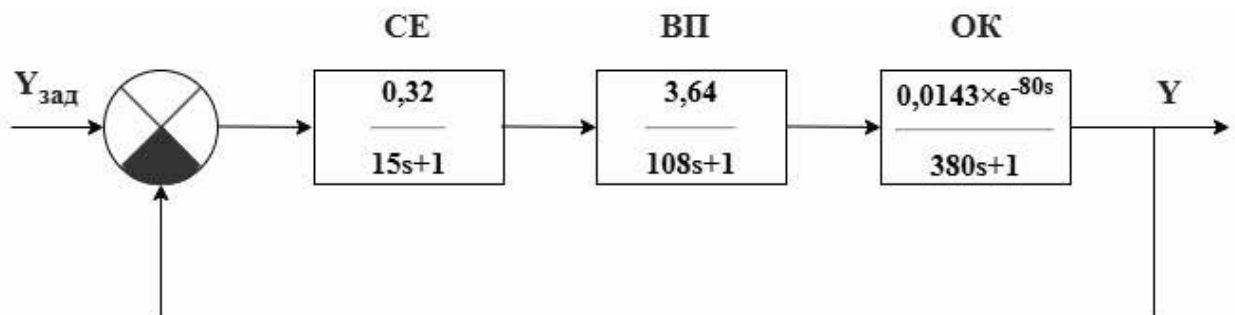


Рис. 3.12. Структурно алгоритмічна схема системи автоматичного регулювання по контуру температури без регулятора

На даній схемі зображено передатні функції:

- CE – сприймаючого елемента;
- ВП – виконавчого пристрою;
- ОК – об'єкта керування.

Аналогічно проведемо розрахунки та побудуємо структурно алгоритмічну схему системи автоматичного регулювання по контуру вологості.

$$k_{зв} = \frac{30 \cdot 600 \cdot 3}{3600} = 15 \quad (3.30)$$

$$k_{\text{Кр}} = \frac{2,5 \cdot 100}{60} = 4,17 \quad (3.31)$$

$$k_{\text{ВПМ}} = 15 \cdot 4,17 = 62,55 \quad (3.32)$$

$$T_{\text{ВПМ}} = \frac{V_p}{\theta_{3B}} = \frac{7200}{30} = 240 \text{ с.} \quad (3.33)$$

Отже, передатна функція виконавчого пристрою по контуру вологості матиме вигляд:

$$W_{\text{ВПМ}}(p) = \frac{62,55}{240 \cdot s + 1} \quad (3.34)$$

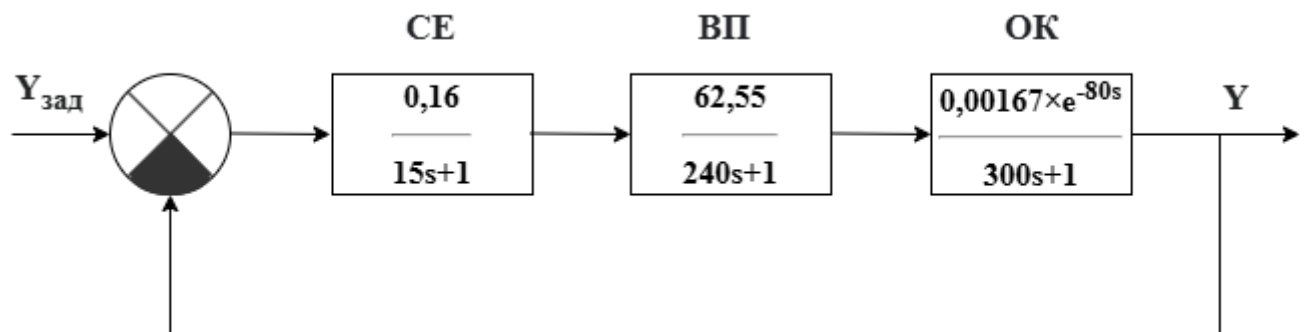


Рис. 3.13. Структурно алгоритмічна схема системи автоматичного регулювання по контуру вологості без регулятора

Визначимо передатну функцію розімкненої системи для температури:

$$\begin{aligned} W_{\text{роз}}(p) &= \frac{0,32}{15p+1} \cdot \frac{3,64}{108p+1} \cdot \frac{0,0143 \cdot e^{-80p}}{380p+1} = \\ &= \frac{0,32 \cdot 3,64 \cdot 0,0143 \cdot e^{-80p}}{(15 \cdot 108 \cdot 380)p^3 + (15 \cdot 108 + 15 \cdot 380 + 108 \cdot 380)p^2 + (15 + 108 + 380)p + 1} \quad (3.35) \\ &= \frac{0,0167 \cdot e^{-80p}}{615600p^3 + 48360p^2 + 503p + 1}. \end{aligned}$$

Та вологості:

$$\begin{aligned}
 W_{\text{роз}}(p) &= \frac{0,16}{15p + 1} \cdot \frac{62,55}{240p + 1} \cdot \frac{0,00167 \cdot e^{-80p}}{300p + 1} = \\
 &= \frac{0,16 \cdot 62,55 \cdot 0,00167 \cdot e^{-80p}}{(15 \cdot 240 \cdot 300)p^3 + (15 \cdot 240 + 15 \cdot 300 + 240 \cdot 300)p^2 + (15 + 240 + 300)p + 1} \quad (3.36) \\
 &== \frac{0,0167 \cdot e^{-80p}}{1080000p^3 + 80100p^2 + 555p + 1}.
 \end{aligned}$$

Оскільки система керування мікрокліматом містить два контури регулювання — температури та вологості, — доцільно визначати період квантування для всієї системи на основі найбільш інерційного контуру.

Як видно з наведених передатних функцій розімкнених систем, контур регулювання вологості характеризується більшою сталою часу. Це свідчить про те, що канал вологості є більш інерційним, а отже, визначає найгірші динамічні властивості системи. Тому саме цей контур доцільно прийняти за основу при виборі періоду квантування.

Змодельуємо перехідний процес системи автоматичного регулювання без регулятора в MATLAB побудувавши Simulink-модель:

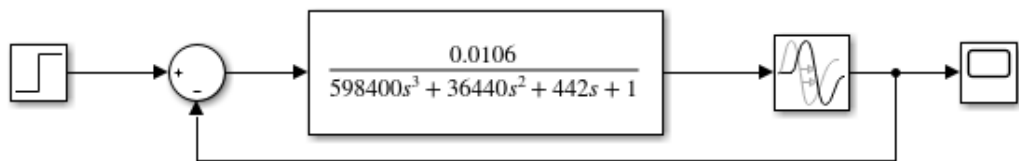


Рис. 3.14. Simulink-модель системи автоматичного регулювання

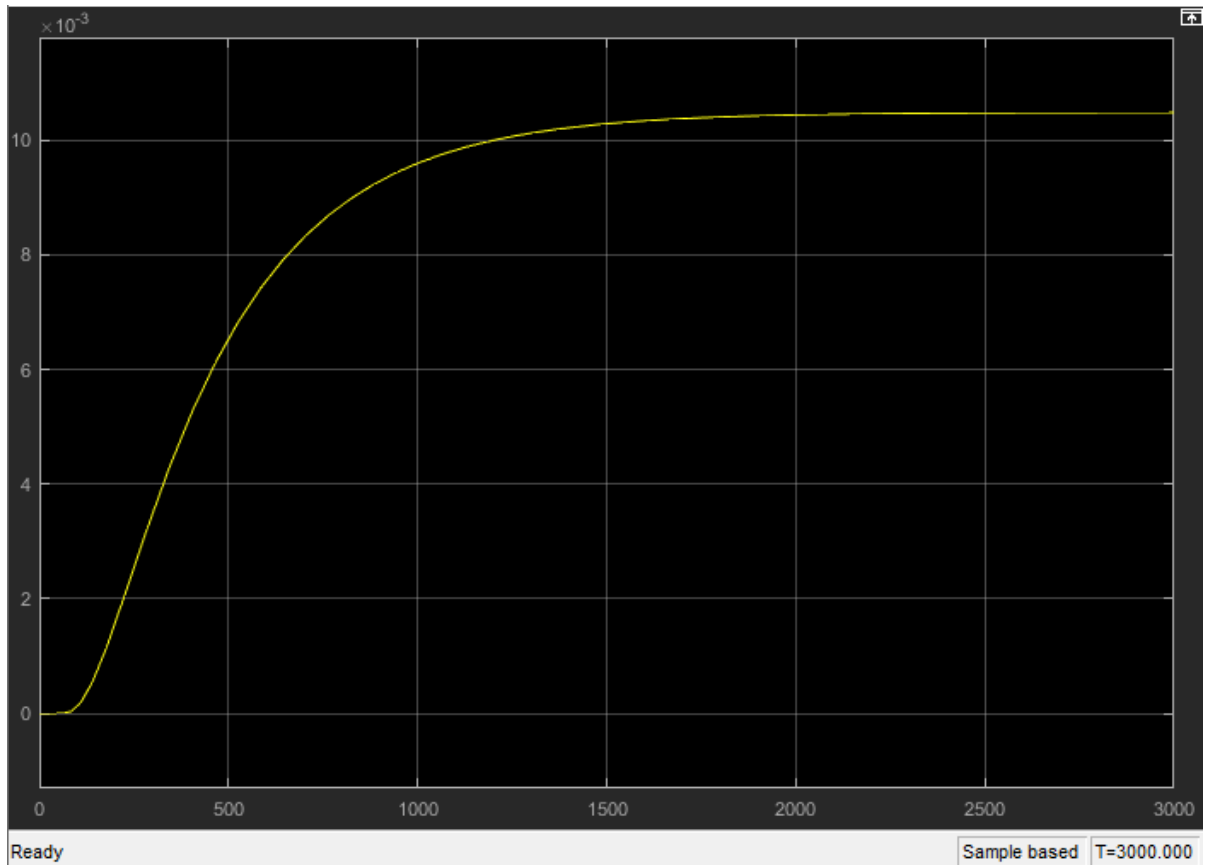


Рис. 3.15. Перехідний процес нескоректованої системи автоматичного регулювання

По графік перехідного процесу нескоректованої САР визначаємо показники якості перехідного процесу:

1. статична похибка $\delta = \frac{\gamma_{\text{зад}} - \gamma_{\text{уст}}}{\gamma_{\text{зад}}} \cdot 100\% = \frac{1 - 0,0105}{1} \cdot 100\% = 98,95\%$;
2. час регулювання $t_p = 2300$ с;
3. перерегулювання $\sigma = \frac{\gamma_{\text{max}} - \gamma_{\text{уст}}}{\gamma_{\text{зад}}} \cdot 100\% = \frac{0,0105 - 0,0105}{0,0105} \cdot 100\% = 0\%$;
4. коливальність $n = 0$.

Аналіз розімкненої системи показує, що вона характеризується значною інерційністю та наявністю запізнення, що призводить до незадовільних показників якості перехідного процесу. У зв'язку з цим для забезпечення заданих показників якості необхідним є застосування регулятора.

3.4. Визначення періоду квантування сигналів цифрової системи керування

Визначення оптимального періоду квантування T_k є важливою задачею синтезу цифрової системи керування (ЦСК), так як значення впливає на точність цифрової системи та навантаження на обчислювальні ресурси контролера.

Оскільки система містить два контури керування (температури та вологості), доцільно обрати єдиний період квантування, орієнтуючись на найбільш інерційний канал. У даному випадку таким є канал регулювання вологості, для якого стала часу є найбільшою.

Нехай неперервна частина цифрової системи керування має передатну функцію:

$$W_{\text{роз.н.ч.}}(p) = \frac{0,0167 \cdot e^{-80p}}{1080000p^3 + 80100p^2 + 555p + 1}. \quad (3.37)$$

А передатна функція неперервної частини замкненої системи матиме вигляд:

$$W_{\text{зам.н.ч.}}(p) = \frac{0,0167 \cdot e^{-80p}}{1080000p^3 + 80100p^2 + 555p + 1 + 0,0167 \cdot e^{-80p}}. \quad (3.38)$$

Амплітудно-фазова частотна характеристика (АФЧХ) неперервної частини замкненої системи:

$$\begin{aligned}
W_{\text{зам.н.ч.}}(j\omega) &= \frac{0,0167 \cdot e^{-j\omega \cdot 80}}{1080000(j\omega)^3 + 80100(j\omega)^2 + 555(j\omega) + 1 + 0,0167 \cdot e^{-j\omega \cdot 80}} = \\
&= \frac{0,0167 \cdot e^{-j\omega \cdot 80}}{-j \cdot 1080000\omega^3 - 80100\omega^2 + 555\omega + 1 + 0,0167 \cdot (\cos 80\omega - j \cdot \sin 80\omega)} = \quad (3.39) \\
&= \frac{0,01325 \cdot e^{-j\omega \cdot 30}}{\underbrace{(1 - 80100\omega^2 + 0,0167 \cdot \cos 80\omega)}_{\text{Re}} + j \cdot \underbrace{(555\omega - 1080000\omega^3 - \sin 80\omega)}_{\text{Im}}}.
\end{aligned}$$

Амплітудно-частотну характеристику неперервної частини замкненої системи знайдемо як модуль АФЧХ цієї системи:

$$\begin{aligned}
A(\omega) &= |W_{\text{зам.н.ч.}}(j\omega)| = \\
&= \frac{0,0167}{\sqrt{(1 - 80100 \cdot \omega^2 + 0,0167 \cdot \cos 80\omega)^2 + (555 \cdot \omega - 1080000 \cdot \omega^3 - \sin 80\omega)^2}} \quad (3.40)
\end{aligned}$$

Знайдемо значення амплітудно-частотної характеристики неперервної частини замкненої автоматичної системи при нульовій частоті $A(0)$.

$$\begin{aligned}
A(0) &= \\
&= \frac{0,0167}{\sqrt{(1 - 80100 \cdot 0^2 + 0,0167 \cdot \cos(80 \cdot 0))^2 + (555 \cdot 0 - 1080000 \cdot 0^3 - \sin(80 \cdot 0))^2}} \quad (3.41) \\
&= \frac{0,0167}{\sqrt{(1 + 0,0167)^2}} = \frac{0,0167}{1 + 0,0167} = \frac{0,0167}{1,0167} = 0,0164.
\end{aligned}$$

З отриманого результату у виразі (3.26) визначаємо праву частину рівняння:

$$A(0) \cdot \theta = 0,0164 \cdot 0,01 = 0,000164. \quad (3.42)$$

Тоді повноцінне рівняння матиме вигляд:

$$\begin{aligned}
&\frac{0,0167}{\sqrt{(1 - 80100\omega^2 + 0,0167 \cdot \cos 80\omega)^2 + (555\omega - 1080000\omega^3 - \sin 80\omega)^2}} = \\
&= 0,000164.
\end{aligned} \quad (3.43)$$

За допомогою середовища MathCad розв'язуємо рівняння (3.33):

Given

$$\frac{0.0167}{\sqrt{(1 - 80100 \cdot \omega^2 + 0.0167 \cdot \cos(80 \cdot \omega))^2 + (555 \cdot \omega - 1080000 \cdot \omega^3 - \sin(80 \cdot \omega))^2}} = 0.000164$$

$$A(\omega) := \frac{0.0167}{\sqrt{(1 - 80100 \cdot \omega^2 + 0.0167 \cdot \cos(80 \cdot \omega))^2 + (555 \cdot \omega - 1080000 \cdot \omega^3 - \sin(80 \cdot \omega))^2}}$$

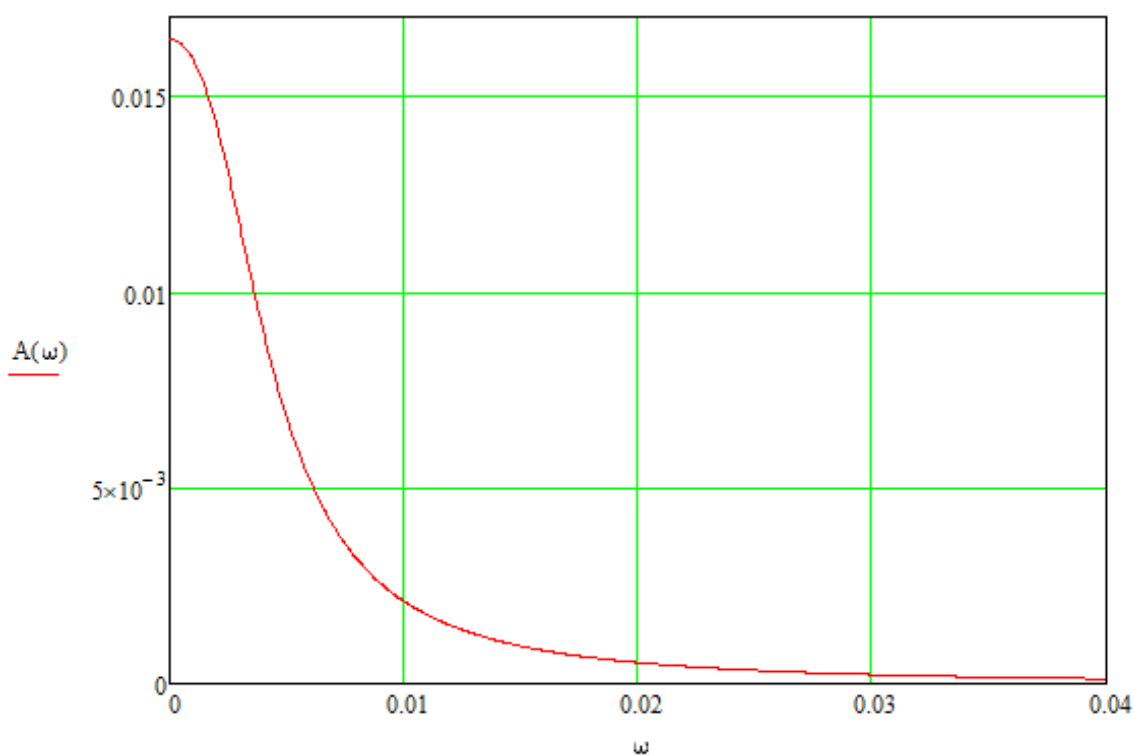


Рис. 3.16. Амплітудно-частотна характеристика неперервної частини системи

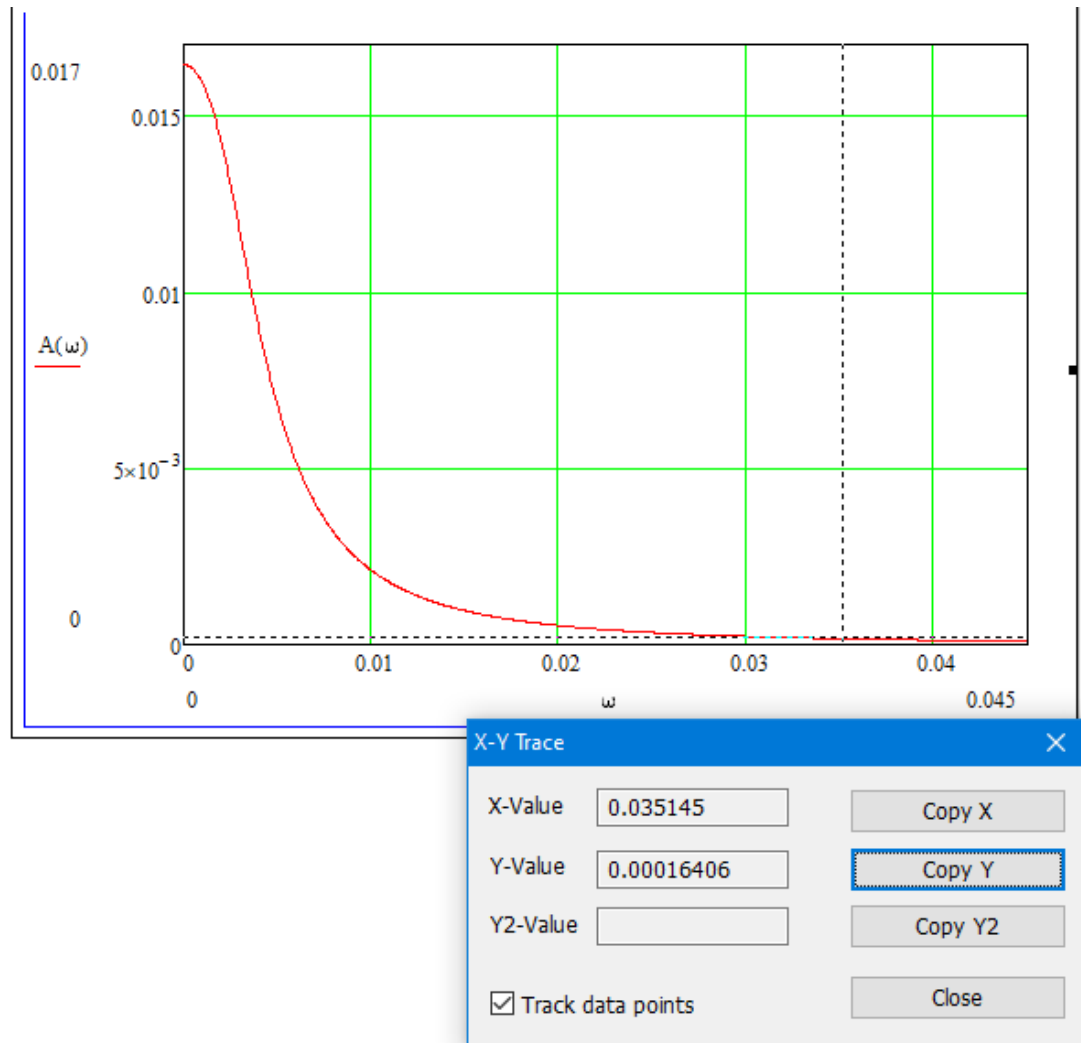


Рис. 3.17. Пошук найбільшої суттєвої частоти на амплітудно-частотна характеристиці

Трасуванням на амплітудно-частотній характеристиці знаходимо суттєву частоту:

$$\omega_c = 0,0351.$$

Максимально допустимий період квантування, що забезпечує максимальну похибку $\theta_{\text{зад}} = 1\%$ (округлюємо її в меншу сторону):

$$T_{\text{ц}} = \frac{\pi}{\omega_c} = \frac{3,14}{0,0351} = 89,46 \approx 89 \text{ с.} \quad (3.44)$$

3.5. Дослідження цифрового ПІД-регулятора

Для побудови повноцінної системи та забезпечення заданих показників якості необхідним є застосування регулятора.

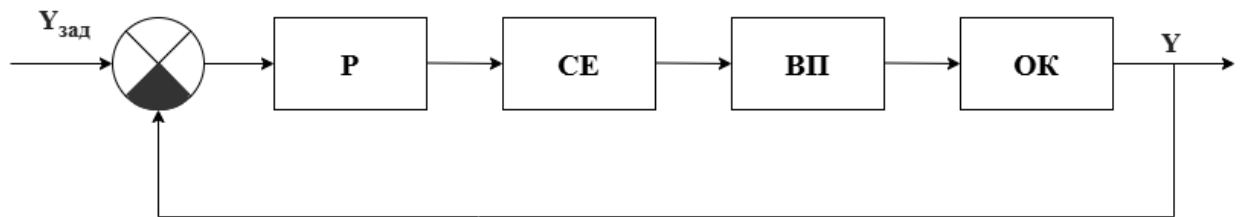


Рис. 3.18. Структурно алгоритмічна схема системи автоматичного регулювання з регулятором

Аналогічно до неперервних систем автоматичного керування, у цифрових системах може бути реалізований пропорційно-інтегрально-диференціальний (ПІД) регулятор, який забезпечує високу точність та якість перехідних процесів.

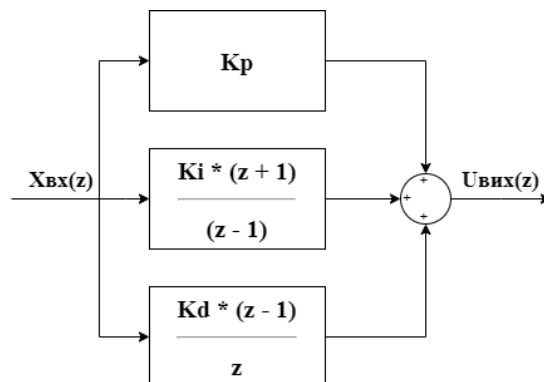


Рис. 3.19. Структурно-алгоритмічна схема цифрового ПІД-регулятора

Де:

- K_p – пропорційна складова;
- K_i – інтегральна складова;
- K_d – диференціальна складова.

Оскільки система керування мікрокліматом включає два контури (температури та вологості), синтез цифрового регулятора доцільно виконувати для найбільш інерційного каналу, яким є контур регулювання вологості.

Для цього знайдемо інтегральну складову, що залежить від добротності за швидкістю Kv неперервної частини і визначається за формулою:

$$Ki = \frac{Kv}{W_{\text{д.н.ч.}}(z)}. \quad (3.45)$$

Добротність за швидкістю визначається залежно від постійної часу об'єкта (див. таблицю 3.11.)

Таблиця 3.10

Залежність коефіцієнту добротності за швидкістю від постійних часу об'єкта

Постійні часу об'єкта T , с	Коефіцієнт добротності за швидкістю Kv
≈ 1	3..10
≈ 10	0,3..1
≈ 100	0,01..0,04
≈ 1000	0,004..0,012

Згідно з таблицею $Kv=0,02$, оскільки $T = 300$ с.

Далі, запишемо нашу передатну функцію неперервної частини системи регулювання:

$$W_{\text{н.ч.}}(p) = \frac{1 \cdot 62,55 \cdot 0,00167}{(240p + 1) \cdot (300p + 1)} = \frac{0,10446}{72000p^2 + 540p + 1}. \quad (3.46)$$

За допомогою чередовища MATLAB визначаємо дискретну передатну функцію неперервної частини системи, до якої входить і фіксатор нульового порядку:

```

Shortcuts  How to Add  What's New

>> W=tf([0.10446], [72000 540 1])

Transfer function:
      0.1045
-----
72000 s^2 + 540 s + 1

>> Wz=c2d(W,10)

Transfer function:
7.075e-005 z + 6.901e-005
-----
      z^2 - 1.926 z + 0.9277

Sampling time: 10

```

Рис. 3.20. Визначення дискретної передатної функції неперервної частини

Виконаємо розв'язок замінивши усі z на 1:

$$W_{\text{д.н.ч.}}(z) = \frac{7,075 \cdot 10^{-5} \cdot 1 + 6,901 \cdot 10^{-5}}{1 - 1,926 \cdot 1 + 0,9277} = 0,0822 \quad (3.47)$$

З виразу 3.40 отримаємо значення інтегральної складової регулятора:

$$K_i = \frac{0,02}{0,0822} = 0,243 \quad (3.48)$$

Після визначення K_i , знаходимо параметр K_p та K_d в компенсуючи два полюси дискретної передаточної функції неперервної частини системи. Для цього сформуємо систему рівнянь в середовищі MathCAD і за допомогою функції *Given-Find* визначимо їх:

$$\begin{aligned}
 T_s &:= 10 & K_p &:= 1 & K_d &:= 1 \\
 \text{Given} \\
 \frac{K_i \cdot T_s^2 - 2K_p \cdot T - 4K_d}{K_i \cdot T_s^2 + 2K_d + 2K_p \cdot T} &= -1.926 \\
 \frac{2 \cdot K_d}{K_i \cdot T_s^2 + 2K_d + 2K_p \cdot T} &= 0.9277 \\
 \text{Find}(K_p, K_d) &= \begin{pmatrix} 102.247 \\ 1.328 \times 10^4 \end{pmatrix}
 \end{aligned}$$

Рис. 3.21. Визначення складових ПД-регулятора

З розв'язку системи рівнянь отримуємо, що пропорційна складова $K_p = 102,247$, а диференційна $K_d = 13280$.

Маючи всі необхідні складові, запишемо передатну функцію цифрового ПІД-регулятора спираючись на його структурно-алгоритмічну схему (рис. 3.21):

$$\begin{aligned}
 W_{\text{ПІД}}(z) &= K_p + \frac{K_i \cdot (z + 1)}{(z - 1)} + \frac{K_d \cdot (z - 1)}{z} = \\
 &= 102,247 + \frac{0,243 \cdot (z + 1)}{(z - 1)} + \frac{13280 \cdot (z - 1)}{z}
 \end{aligned}
 \quad (3.49)$$

Визначивши передатну функцію цифрового ПІД-регулятора, відобразимо параметри на алгоритмічну схему з регулятором:

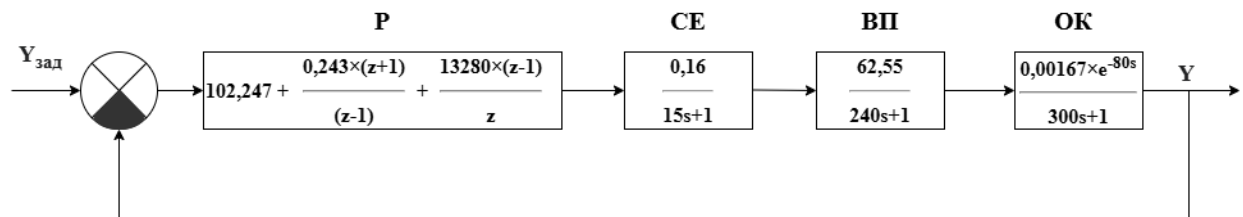


Рис. 3.22. Структурна алгоритмічна схема системи з регулятором

Отримавши передатну функцію цифрового ПІД-регулятора, виконаємо дослідження показників якості роботи системи використовуючи середовище MATLAB Simulink:

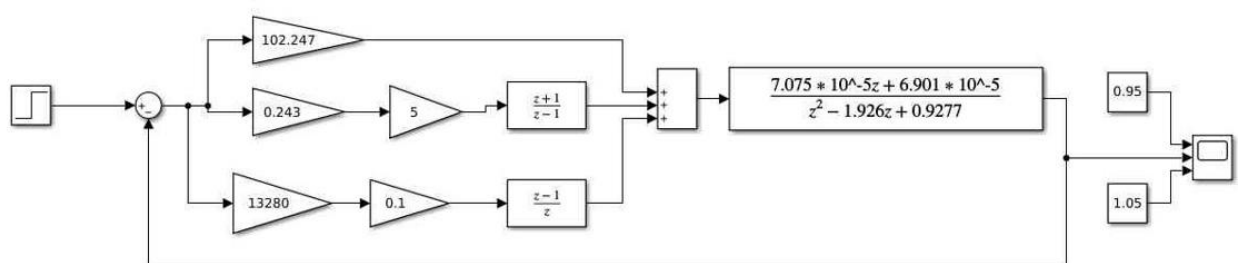


Рис. 3.23. Структурна модель цифрового ПІД-регулятора в Simulink

На осцилограмі перехідного процесу видно, що дискретний характер сигналу проявляється у вигляді ступінчастого перехідного процесу, який обумовлено обраним періодом квантування.

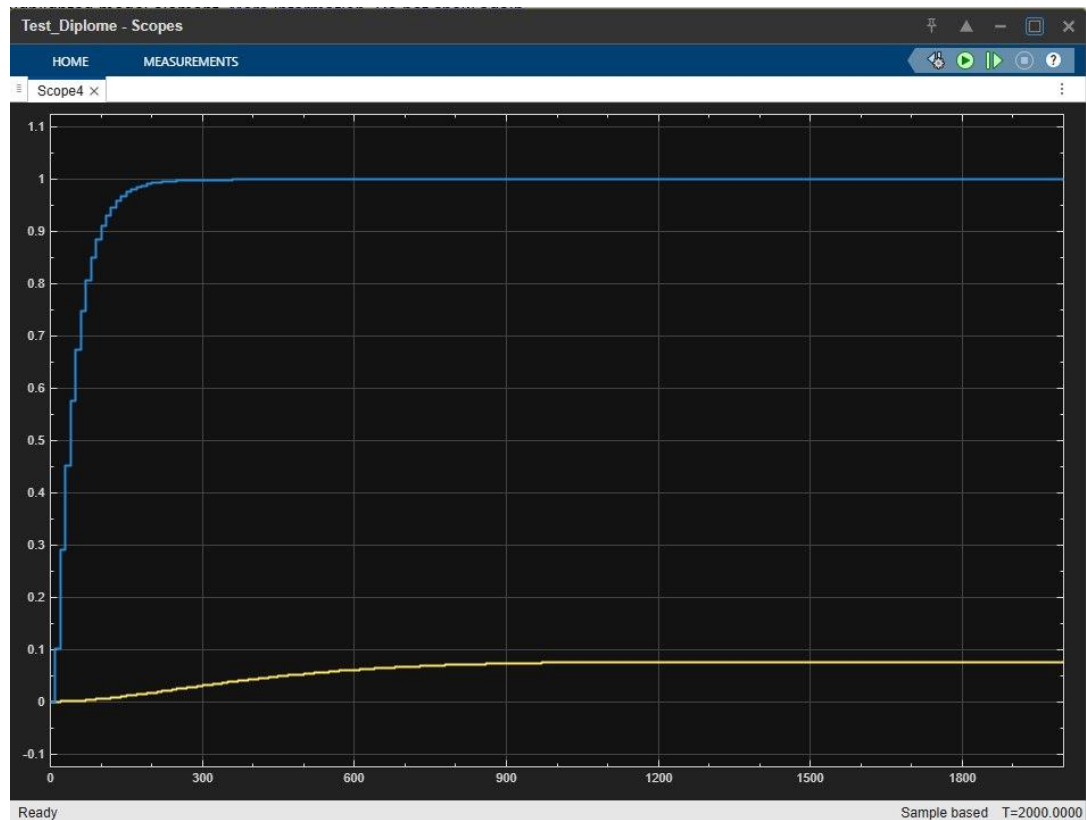


Рис. 3.24. Перехідні процеси цифрової системи з ПІД-регулятором (верхній графік) і П-регулятором з коефіцієнтом 1 (нижній)

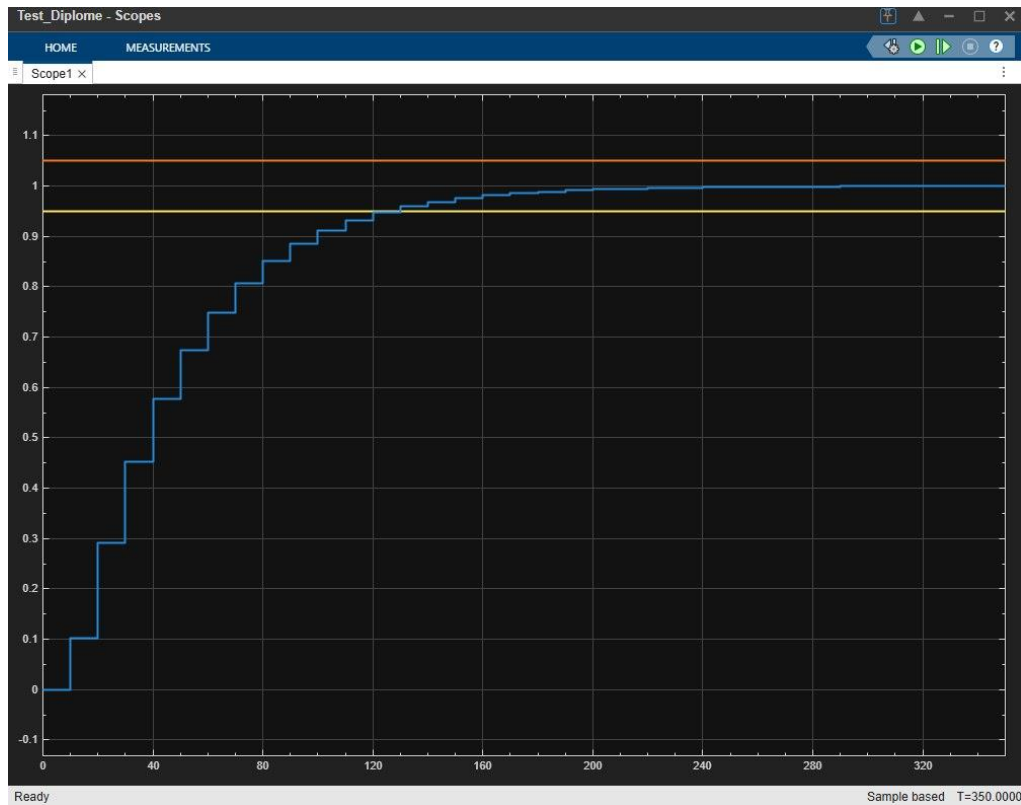


Рис. 3.25. Перехідний процес цифрової системи з ПІД – регулятором

3.6. Дослідження цифрового ПІД-регулятора на стійкість та якість

Після синтезу цифрового ПІД-регулятора виконується дослідження замкненої системи керування з метою оцінки її стійкості та показників якості перехідного процесу.

Перехідний процес цифрової системи з ПІД-регулятором наведено на рис. 3.25.

Стійкість цифрової системи керування визначається розташуванням коренів характеристичного рівняння у z -площині. Необхідною та достатньою умовою стійкості є розміщення всіх коренів всередині одиничного кола:

$$|z_i| < 1 \quad (3.50)$$

Аналітичне визначення коренів характеристичного рівняння для системи високого порядку є складним, тому оцінка стійкості виконана шляхом моделювання в середовищі MATLAB Simulink.

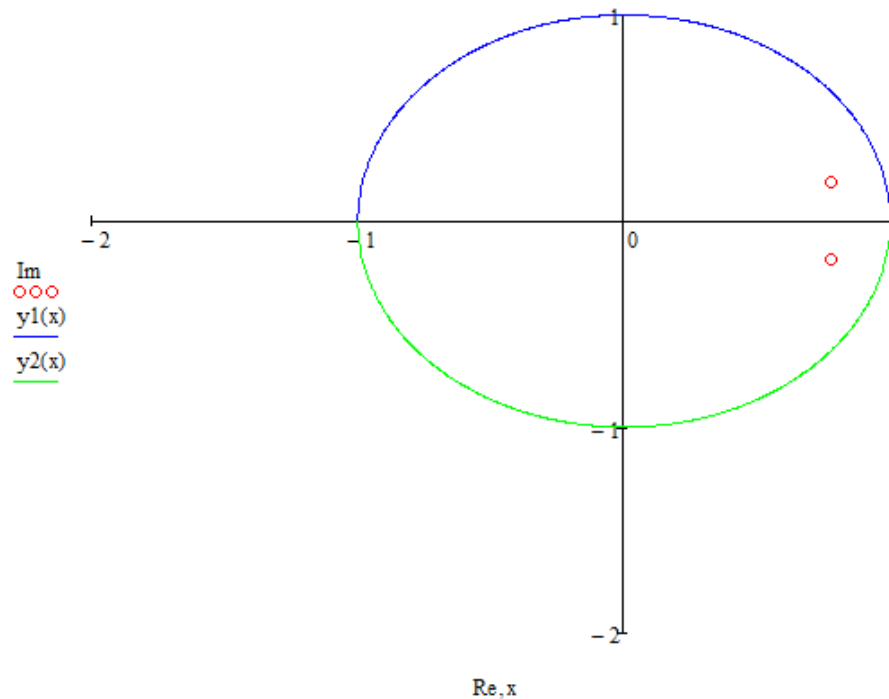


Рис. 3.26. Розташування коренів характеристичного рівняння на Z-площині відносно одиничного кола

$$\text{Re} = \begin{pmatrix} 0.7786985 \\ 0.7786985 \end{pmatrix} \quad \text{Im} = \begin{pmatrix} 0.1903457 \\ -0.1903457 \end{pmatrix}$$

Рис. 3.27. Корені характеристичного рівняння

За результатами розташування коренів відносно одиничного кола видно, що всі корені знаходяться всередині одиничного кола, що свідчить про асимптотичну стійкість системи.

Тепер, отримавши перехідний процес цифрової системи з ПД – регулятором, знайдемо його показники якості:

- статична похибка $\delta = \frac{y_{\text{зад}} - y_{\text{уст}}}{y_{\text{зад}}} \cdot 100\% = \frac{1-1}{1} \cdot 100\% = 0\%$;
- час регулювання $t_p = 130$ с;
- перерегулювання $\sigma = \frac{y_{\text{max}} - y_{\text{уст}}}{y_{\text{зад}}} \cdot 100\% = \frac{1-1}{1} \cdot 100\% = 0\%$;
- коливальність $n = 0$.

З отриманих результатів видно, що система не має статичної похибки, оскільки усталене значення вихідної величини повністю відповідає заданому. Час регулювання становить 130 с, що свідчить про достатньо швидку реакцію системи та є кращим показником порівняно з використанням лише пропорційного регулятора. Також у перехідному процесі відсутні перерегулювання та коливання, що вказує на аперіодичний характер процесу та стабільну роботу системи.

Отже, застосування ПД-регулятора забезпечує покращення динамічних характеристик системи керування та підвищує якість перехідного процесу.

РОЗДІЛ 4. АПАРАТНА РЕАЛІЗАЦІЯ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ ТА ОЦІНКА ЇЇ НАДІЙНОСТІ

4.1. Вибір регулятора та периферії

Для реалізації автоматичного керування системою підтримки мікроклімату необхідно обрати відповідний комплекс технічних засобів. Як базовий елемент доцільно використати контролер виробництва компанії АКУТЕК, зокрема програмований логічний контролер ПЛК-160 [U22].



Рис. 4.1. Програмований логічний контролер АКУТЕК ПЛК 160 [U22]

Даний контролер має низку суттєвих переваг порівняно з аналогічними пристроями. Зокрема, він характеризується відносно невисокою вартістю, виготовляється в Україні, оснащений значною кількістю цифрових і аналогових входів та виходів, а також має достатню обчислювальну потужність. Крім того, контролер підтримує поширені інтерфейси зв'язку RS-485 та RS-232. А також важливою перевагою є також можливість програмування пристрою в середовищі CodeSys.

Таблиця 4.1

Технічні характеристики ПЛК160-220

Центральний процесор	RISC-процесор Texas Instruments Sitara AM1808
Частота процесора	400 МГц
Об'єм оперативної пам'яті (SDRAM)	Програма користувача: 1 Мб Дані програми користувача: 128 Кб Heap: до 4 Мб RAM-диск: 8 Мб
Розмір Retain-пам'яті (MRAM)	16 Кб
Конструктивне виконання	Габаритні розміри (ВхШхГ), мм (208 × 110 × 83) ± 1 мм
Ступінь захисту корпусу зі сторони лицевої панелі	IP20
Напруга живлення	від 90 до 264 В змінного струму (номінальне 120 або 230 В) частотою від 47 до 63 Гц (номінальне значення 50 Гц)
Споживана потужність, не більше	45 ВА
Параметри вбудованого вторинного джерела живлення	вихідна напруга 24 ± 3 В, струм не більше 180 мА
Кількість дискретних входів	16
Кількість дискретних виходів	12
Напруга живлення дискретних входів	24 ± 3 В
Кількість аналогових входів	8
Кількість аналогових виходів	4
Тип підтримуючих уніфікованих сигналів	струм 4...20 мА; струм 0...5 мА; напруга 0...10 В.
Мінімальний період оновлення виходів	100 мс
Період опитування одного входу	10 мс

Основні переваги контролера:

- Швидкісні входи для обробки енкодерів.
- Вбудовані дискретні та аналогові входи/виходи на борту.
- Робота за заздалегідь обумовленими сценаріями при підключенні до контролера USB-накопичувачів або ведення архіву роботи обладнання.
- Просте та зручне програмування у системі CODESYS V.2 через порти USB Device, Ethernet, RS-232 Debug.
- Плати розширення інтерфейсів RS-485, RS-232.
- Живлення: 220 В і 24 В.

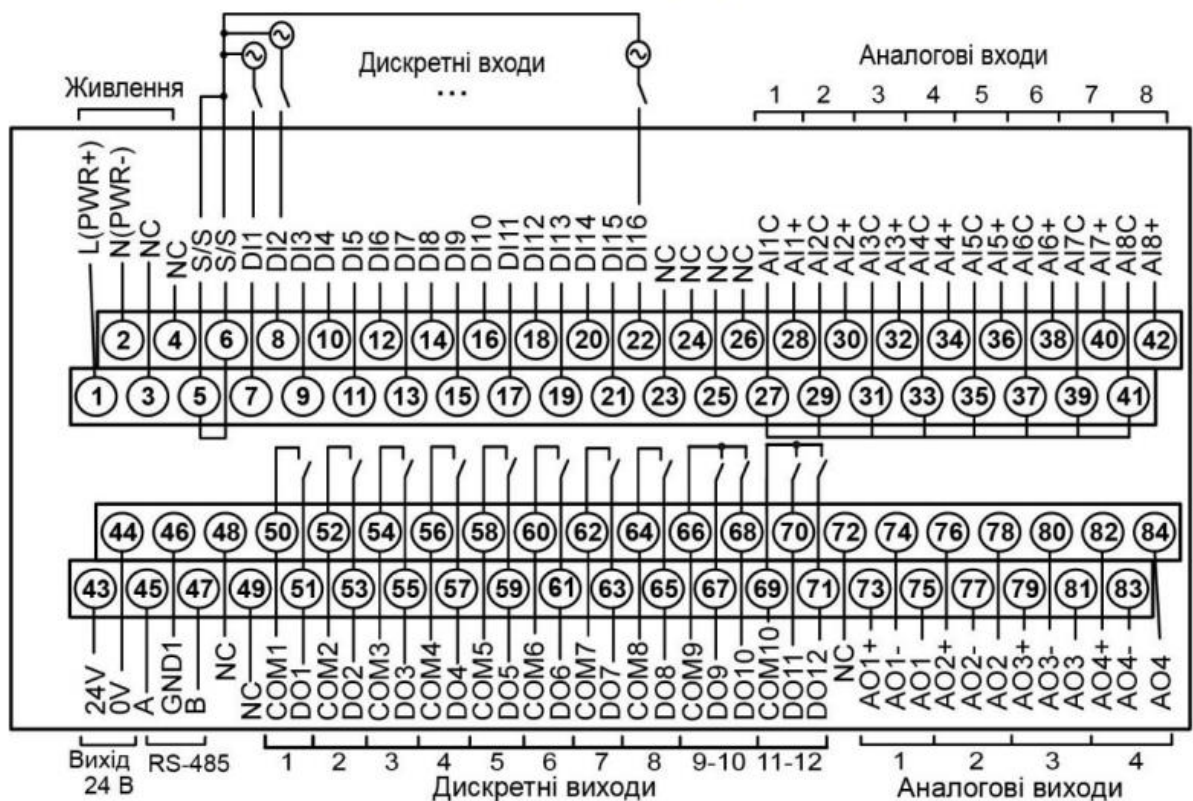


Рис. 4.2. Схема розташування і призначення клем на пристрої

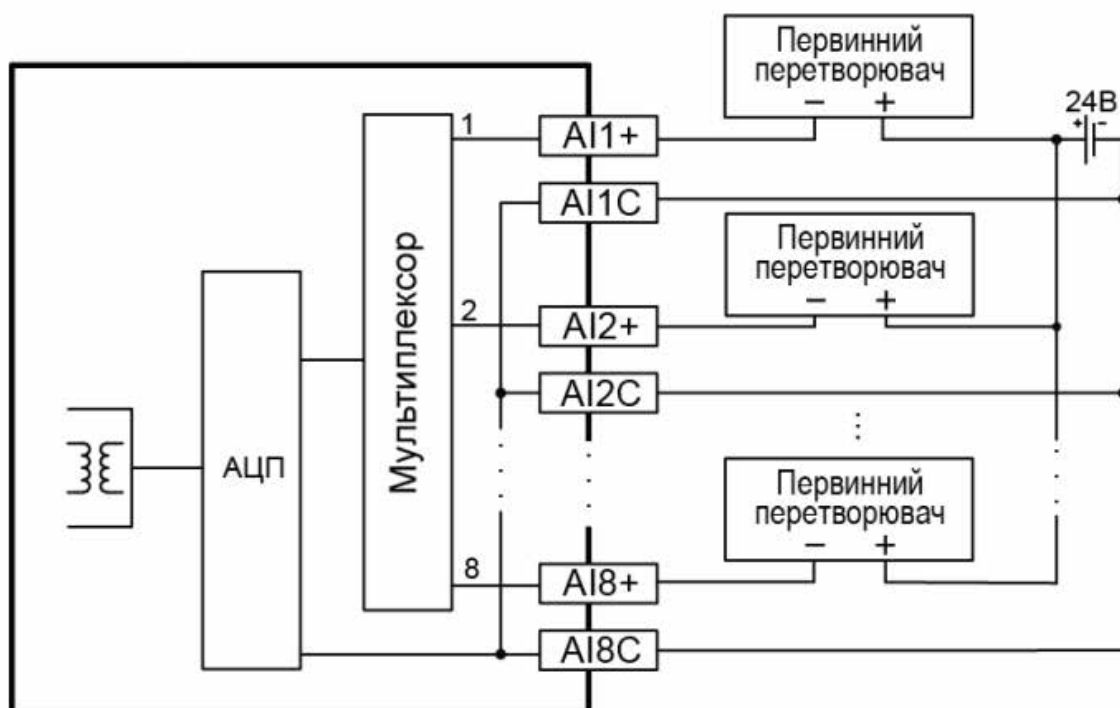


Рис. 4.3. Схема підключення давачів до ПЛК

Для керування швидкістю обертання вентиляторів припливної та витяжної вентиляції у системі застосовано частотні перетворювачі типу ПЧВ1-2К2-В.



Рис. 4.4. Вигляд частотного перетворювача ПЧВ1-2К2-В

Таблиця 4.2

Технічні характеристики ПЧВ1-2К2-В

Назва модифікації	ПЧВ1-2К2-В
Напруга живлення	380...480 В
Потужність	2.2 кВт
Вихідна частота	0...200 Гц
Вхідний струм $I_{вх}$, А	8,5
Номінальний вихідний струм $I_{вих}$, А	5,2
Вихідний струм перевантаження $I_{вих} \times 150\%$, А*	7,8
Максимальний вихідний струм $I_{вих.макс} \times 160\%$, А**	8,3
ККД, %	97,1
Кількість дискретних входів	5
Кількість аналогових входів	2 (1 (0..10В/0.4..20мА), 1 (0.4..20мА))
Кількість аналогових виходів	1
Кількість релейних виходів	1 (240 В, 2 А)
Кількість аналогових виходів	4
Вбудоване джерело живлення	10 В 25 мА; 24 В 100 мА.
Клас захисту корпусу	IP20
Діапазон робочих температур	0...+40 °С
Габаритні розміри (Ш × В × Г)	75 × 176 × 168 мм

Даний перетворювач призначений для керування асинхронними електродвигунами шляхом зміни частоти та напруги живлення, що дозволяє плавно регулювати швидкість обертання виконавчих механізмів. Використання частотного регулювання забезпечує зниження енергоспоживання, підвищення ресурсу обладнання та можливість реалізації гнучких алгоритмів керування мікрокліматом.

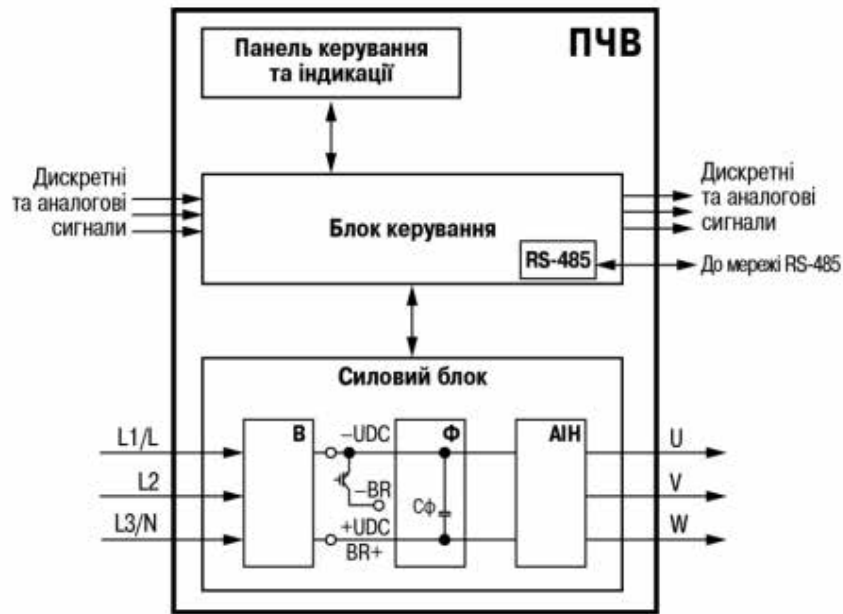


Рис. 4.5. Функціональна схема ПЧВ

Напруга трифазної мережі живлення подається на клеми L1/L, L2 і L3/N, далі проходить через випрямляч В, блок Ф для фільтрації мережевих пульсацій та на блок АІН, де перетворюється на симетричну трифазну систему напруги з регульованими параметрами, амплітудою і частотою і видається на вихідні клеми U, V, W для керування швидкістю обертання електродвигуна.

Для забезпечення візуалізації процесів та взаємодії оператора з системою керування використовується панель оператора СП315-Р.



Рис. 4.6. Вигляд сенсорної панелі оператора СП315-Р

Дана панель призначена для відображення технологічних параметрів, налаштування режимів роботи системи, а також для здійснення ручного керування обладнанням.

Таблиця 4.3

Технічні характеристики СП315-Р

Назва модифікації	СП315-Р
Напруга живлення	23...27 В
Номинальна напруга живлення	24 В
Тип напруги живлення	Постійна
Потужність	20 Вт
Макс. споживаний струм	0,75 А
Частота процесора	400 МГц
Обсяг Flash-пам'яті	128 Мб
Оперативна пам'ять	128 Мб
Годинник реального часу (RTC)	Є, енергонезалежний
Кількість DIP-перемикачів	4
Тип дисплея	TFT LCD
Діагональ екрану	15,6"
Роздільна здатність	1366×768
Яскравість	250 кд/м ²
COM-порти	1 × RS-232 / RS-485 - для підмикання пристроїв і завантаження проєктів; 1 × RS-232/RS-485– для підмикання пристроїв; 1 × USB 2.0 В - для завантаження проєктів.
Габаритні розміри (Ш × В × Г)	410 × 270 × 65 мм
Ступінь захисту корпусу	IP65
Робоча температура	0...+50 °С

4.2. Вибір пускозахисної апаратури, проводів та кабелів

4.2.1 Вибір автоматичних вимикачів

Керування та перемикання електричних приладів та кіл супроводжується рубильниками, автоматичними вимикачами, кнопками керування, пакетно-кулачковими перемикачами, контакторами та електромагнітними пускачами.

Так як система має виконавчі механізми, зокрема електродвигуни, то необхідно застосовувати пускову апаратуру, необхідно правильно підібрати автоматичний вимикач. Даний прилад виконує функцію захисту електроустановок і електричних кіл від перевантажень, коротких замикань та інших аномальних режимів роботи. Спираючись на характеристики електродвигунів, нагрівача та зволожувача обираємо пускозахисну апаратуру за таким виразом:

$$I_{\text{від.роз.}} \geq 1,8 \cdot \left(\sum_{i=1}^{i=n-1} I_{\text{ном.і.}} + I_{\text{пуск.найб.}} \right) \quad (4.1)$$

Де:

- $I_{\text{номі}}$ - номінальний струм i -го електродвигуна, А;
- $I_{\text{пуск.найб.}}$ — пусковий струм найбільшого за пусковим струмом електродвигуна, А.

Виконаємо розрахунки за виразом 4.1:

$$I_{\text{від.роз.}} = 1,8 \cdot (3,46 \cdot 2 + 0,125 + 13,5 + 0,05 + 35) = 100,071 \approx 100 \text{ А} \quad (4.2)$$

З отриманого результату, обираємо автоматичний вимикач IEK SVA10-3-0100-U.



Рис. 4.9. Автоматичний вимикач IEK SVA10-3-0100-U

Також, окремо підберемо автоматичний вимикач для двигунів, нагрівача та зволожувача.

Для усіх двигунів візьмемо трьохполюсний автоматичний вимикач IEK MVA20-3-006-C з номінальним струмом на 6 ампер.



Рис. 4.10. Автоматичний вимикач IEK MVA20-3-006-C

Окремо для нагрівача оберемо трьохполюсний автоматичний вимикач Schneider Electric EZ9F34340 з номінальним струмом на 40 ампер.



Рис. 4.11. Автоматичний вимикач Schneider Electric Easy9 3P 40A

Аналогічно оберемо і для зволожувача, а трьохполюсний автоматичний вимикач Schneider Electric iC60N 3P 16A з номінальним струмом на 16 ампер.



Рис. 4.12. Автоматичний вимикач Schneider Electric iC60N 3P 16A

4.2.2 Вибір електромагнітних пускачів

Керування виконавчими механізмами системи мікроклімату передбачається за допомогою електромагнітних пускачів, які забезпечують дистанційне вмикання та вимикання навантажень за сигналами від програмованого логічного контролера.

Для керування малопотужними електродвигунами (заслінка, допоміжні приводи) обрано електромагнітний пускач ETI CEC 6.10 230V/AC 6A з номінальним струмом 6 А, що відповідає параметрам навантаження та забезпечує надійну комутацію.



Рис. 4.13 - Магнітний пускач ETI CEC 6.10 230V/AC 6A

Для керування ультразвуковим зволожувачем повітря, номінальний струм якого становить 13,5 А, обрано пускач ETI CEC 16.01 230V/AC 16A. Вибір виконано з урахуванням запасу по струму, що забезпечує стабільну роботу пристрою та підвищує довговічність комутаційної апаратури.



Рис. 4.14 - Магнітний пускач ETI CEC 16.01 230V/AC 16A

Для керування електронагрівачем, який характеризується значним споживаним струмом, застосовано пускач ETI CEM 40.11 230V/AC 40A з номінальним струмом 40 А. Використання пускача з котушкою керування на 230 В забезпечує безпечне та надійне керування від ПЛК.



Рис. 4.15 - Магнітний пускач ETI CEM 40.11 230V/AC 40A

4.2.3 Вибір теплових реле

Захист електрообладнання від перевантажень та перегрівів у системі передбачено застосуванням теплових реле, які забезпечують відключення навантаження при перевищенні допустимого струму протягом певного часу.

Для захисту серводвигунів заслінки та крану від перегріву обрано теплове реле Hager EVB001A, що має струмовий діапазон 1,0-1,6 Ампер.



Рис. 4.16. Тепловое реле Hager EVB001A

4.2.4 Вибір запобіжника

Захист обладнання від перенапруг, а саме в колі керування, супроводжується використанням запобіжника. Так як коло керування є слаботочним, необхідно підібрати запобіжник зі струмом в районі 5-10 А. Спираючись на це, оберемо запобіжник АСКО-УКРЕМ NH00 10A gG з номінальним струмом 10 А і номінальною напругою 500 В (див рис. 4.18.).



Рис. 4.18. Плавкий запобіжник АСКО-УКРЕМ NH00 10A gG

4.2.5 Вибір трансформатора

Для живлення кіл керування в системі використано однофазний понижуючий трансформатор типу NDK-250VA (див. рис. 4.19). Даний трансформатор призначений для перетворення напруги та забезпечення гальванічної розв'язки між силовими та керуючими колами. Трансформатор має первинну обмотку на напругу 380 В та вторинні обмотки на 230 В і 110 В.



Рис. 4.19. Однофазний понижуючий трансформатор NDK-250VA 380 220/220

110 IEC

4.2.6 Вибір блока живлення

Для живлення програмованого логічного контролера, аналогових датчиків, панелі оператора та допоміжних кіл керування було обрано імпульсний блок живлення HDR-60-24 MEAN WELL.



Рис. 4.20. Імпульсний блок живлення HDR-60-24 MEAN WELL

Даний блок живлення забезпечує стабілізовану вихідну напругу 24 В постійного струму при максимальному струмі навантаження 2,5 А та потужності 60 Вт.

4.2.7 Вибір кнопок та перемикачів

Для вибору режимів роботи системи (ручний/автоматичний) використовується кулачковий перемикач ETI 004773104 CS 16 51 U (рис. 4.20). Даний перемикач має три фіксовані положення, що дозволяє реалізувати перемикання між режимами керування системою, забезпечуючи зручність експлуатації та надійність роботи.



Рис. 4.21. Трьохпозиційний кулачковий перемикач ETI 004773104 CS 16 51 U

Для керування виконавчими механізмами системи застосовуються кнопки управління. Для подачі команди на вмикання обладнання використовується кнопка «Пуск» АСКО XB2-EA135 (рис. 4.22) без фіксації. Вона забезпечує короткочасне замикання контактів для запуску системи. Для зупинки системи та аварійного вимкнення використовується кнопка «Стоп» грибоподібного типу АСКО XB2-BR42 (рис. 4.23)



Рис. 4.22. Кнопка АСКО XB2-EA135 Старт



Рис. 4.23. Кнопка АСКО XB2-BR42 СТОП "Грибок"

4.2.8 Вибір сигнальних ламп

Для візуального контролю стану роботи системи та її окремих елементів застосовуються сигнальні лампи. В якості індикаторів обрано лампи AsKo AD22-22DS (див. рис. 4.24), які забезпечують світлову індикацію стану електричних кіл.



Рис. 4.24. Сигнальна лампа AsKo AD22-22DS

4.3. Вибір проводів та кабелів

Для підключення силового електрообладнання (електродвигунів вентиляторів, виконавчих механізмів, пускозахисної апаратури та електронагрівача) використовується силовий кабель ВВГнг 5×2.5 мм² (рис. 4.25).



Рис. 4.25. Вигляд силового кабелю ВВГнг 5х2,5

Кабель має п'ять мідних жил перерізом $2,5 \text{ мм}^2$ кожна, ізоляція яких виконана з полівінілхлориду. Така ізоляція забезпечує стійкість до впливу вологи, температурних коливань та механічних навантажень. Кабель не поширює горіння, що дозволяє використовувати його у пожежонебезпечних приміщеннях.

П'ятижильне виконання кабелю обумовлене використанням трифазної мережі: три жили призначені для фазних провідників, одна — для нульового провідника, та одна — для захисного заземлення. Кабель призначений для стаціонарного прокладання та забезпечує надійну роботу в діапазоні температур від -50 до $+50 \text{ }^\circ\text{C}$, при цьому допустима температура нагріву жил не перевищує $70 \text{ }^\circ\text{C}$.

Термін служби кабелю за умов правильної експлуатації становить до 25 років.

Для підключення датчиків температури та вологості використовується екранований кабель керування FR2OH2R $3 \times 0,5 \text{ мм}^2$ (рис. 4.26).



Рис. 4.26. Екранний кабель управління FR2OH2R

Даний кабель має три жили перерізом $0,5 \text{ мм}^2$ та екран, який забезпечує захист сигналів від електромагнітних перешкод. Ізоляція виконана з матеріалу, що не підтримує горіння та характеризується низьким рівнем виділення корозійно-активних газів. Сам кабель призначений для роботи в слаботочних колах керування, має високу гнучкість та забезпечує стабільну передачу сигналів у діапазоні температур від -25 до $+70 \text{ }^\circ\text{C}$.

Важливою частиною у шафі керування є вибір клемних затискачів. Для цього оберемо АКУТЕК MTU-2.5RD (рис. 4.27), які встановлюються на DIN-рейку шириною 35 мм.



Рис. 4.27. Гвинтова клема MTU-2.5RD

Дані клеми забезпечують надійне електричне з'єднання провідників перерізом до 2,5 мм², що відповідає обраним кабелям. Використання клемних з'єднань спрощує монтаж, обслуговування та підвищує надійність електричних з'єднань.

4.4 Розробка електричної принципової схеми

Розроблена схема містить силову частину, кола керування, програмований логічний контролер, засоби операторського інтерфейсу, датчики та перетворювачі частоти.

Живлення силового кола здійснюється від трифазної мережі ~400 В, 50 Гц через автоматичний вимикач QF1, який виконує функцію загального вводу та захисту системи. Для живлення елементів керування використовується понижуючий однофазний трансформатор Т1, який знижує напругу з 400 В до 230 В. Захист кола керування від перевантажень та коротких замикань здійснюється запобіжником FU1.

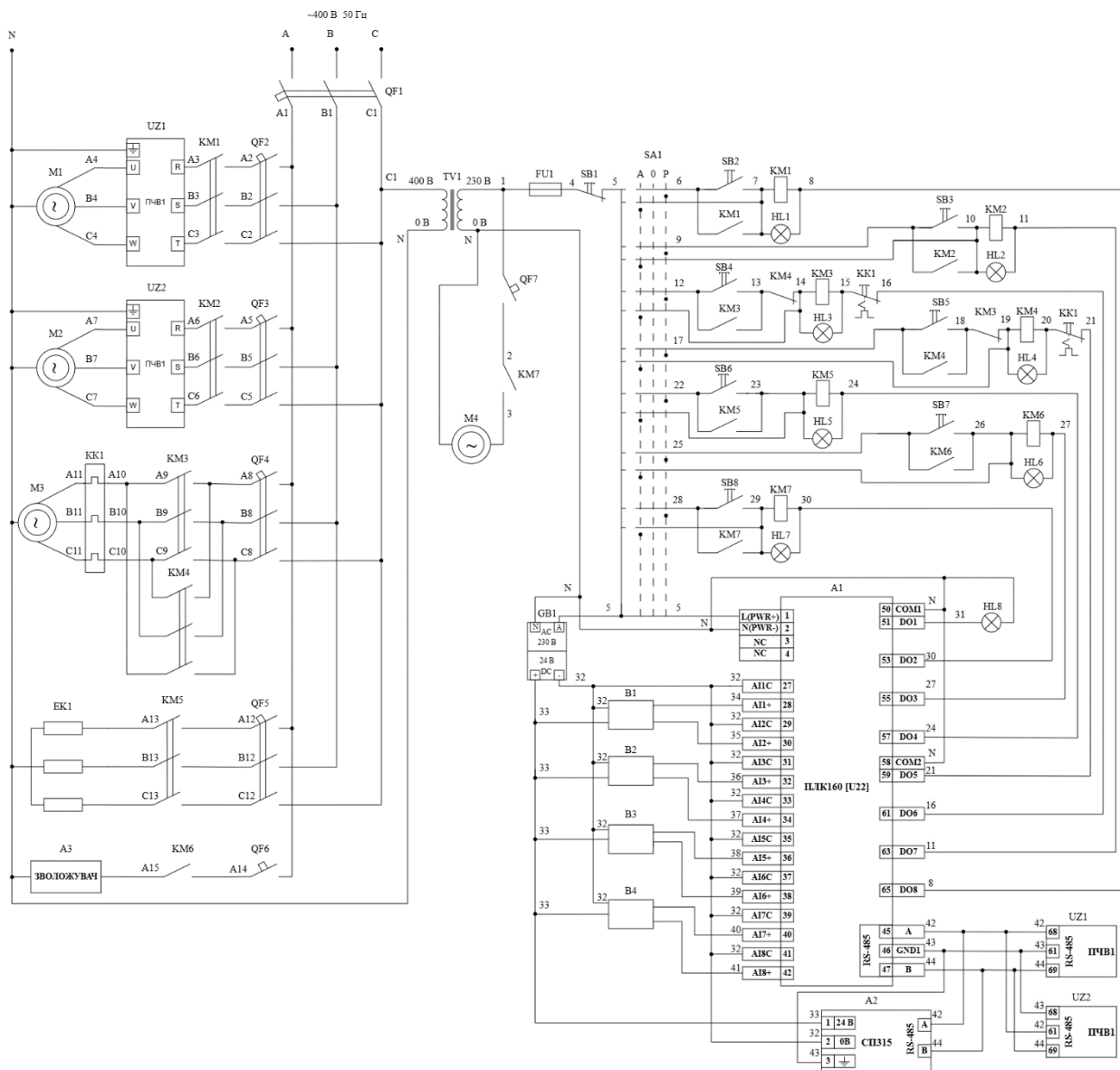


Рис. 4.28. Фрагмент електричної принципової схеми системи

Пуск системи здійснюється кнопкою SB1 «СТАРТ», після чого керування реалізується залежно від положення кулачкового перемикача SA1. Перемикач має три режими роботи: «А» – автоматичний режим, «О» – вимкнений режим та «Р» – ручний режим.

У автоматичному режимі сигнали керування надходять до програмованого логічного контролера А1 – ПЛК160 [U22].

Контролер виконує обробку інформації від давачів температури та вологості В1–В4, що підключені за струмовим інтерфейсом 4–20 мА. Живлення датчиків здійснюється від джерела постійного струму GB1 напругою 24 В.



Рис. 4.29. Вигляд давача температури та вологості на схемі

Через магнітні пускачі КМ1–КМ8 здійснюється комутація силового обладнання системи, а також керування вентиляторами, нагрівачем та допоміжними виконавчими механізмами. Для індикації стану роботи окремих вузлів використовуються сигнальні лампи НЛ1–НЛ9. Сигнальні лампа НЛ9 відповідає за сигналізацію аварії в системі.

Керування вентиляторами М1 та М2 реалізується через перетворювачі частоти UZ1 та UZ2 типу ПЧВ1, що дозволяє плавно регулювати швидкість обертання електродвигунів та зменшити пускові струми.

Панель оператора СП315 використовується для візуалізації параметрів мікроклімату, відображення аварійних повідомлень, зміни уставок та контролю режимів роботи системи.

У ручному режимі керування виконується за допомогою кнопок SB2–SB9, які забезпечують безпосереднє ввімкнення відповідних магнітних пускачів.

Для захисту виконавчих механізмів у схемі передбачені теплові реле КК1 та КК2, а також автоматичні вимикачі QF2–QF7, що забезпечують захист силових кіл від перевантажень та коротких замикань.

4.5 Розробка схеми з'єднань

Розробка схеми з'єднань виконувалась на основі електричної принципової схеми системи керування мікрокліматом овочесховища. На схемі з'єднань відображаються всі основні елементи системи, що задіяні в електричній принциповій схемі. Для кожного пристрою збережено позиційні позначення, що спрощує проведення монтажних робіт.

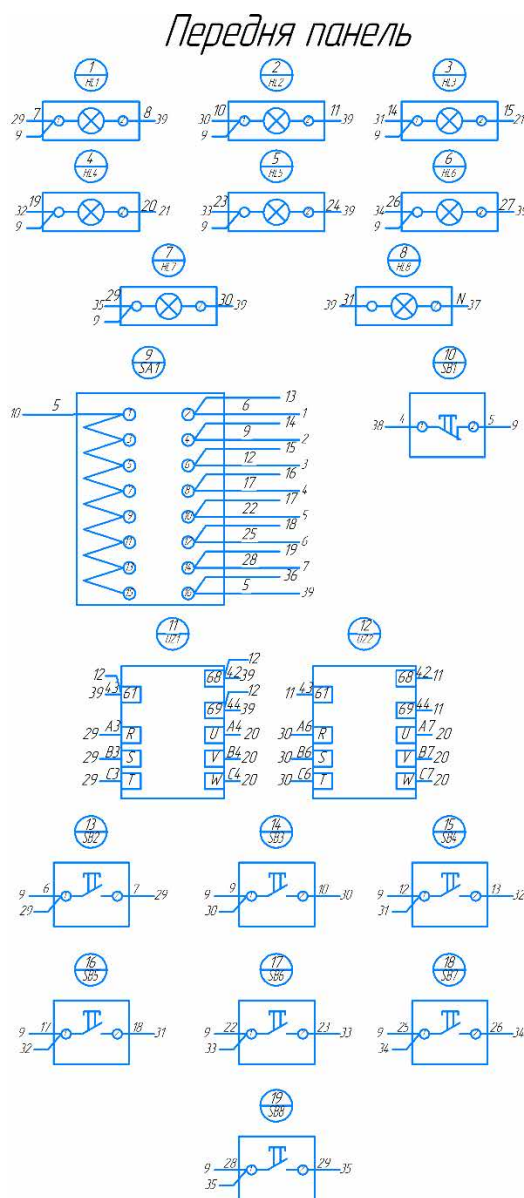


Рис. 4.30. Фрагмент передньої панелі щита схеми з'єднань

Задня панель

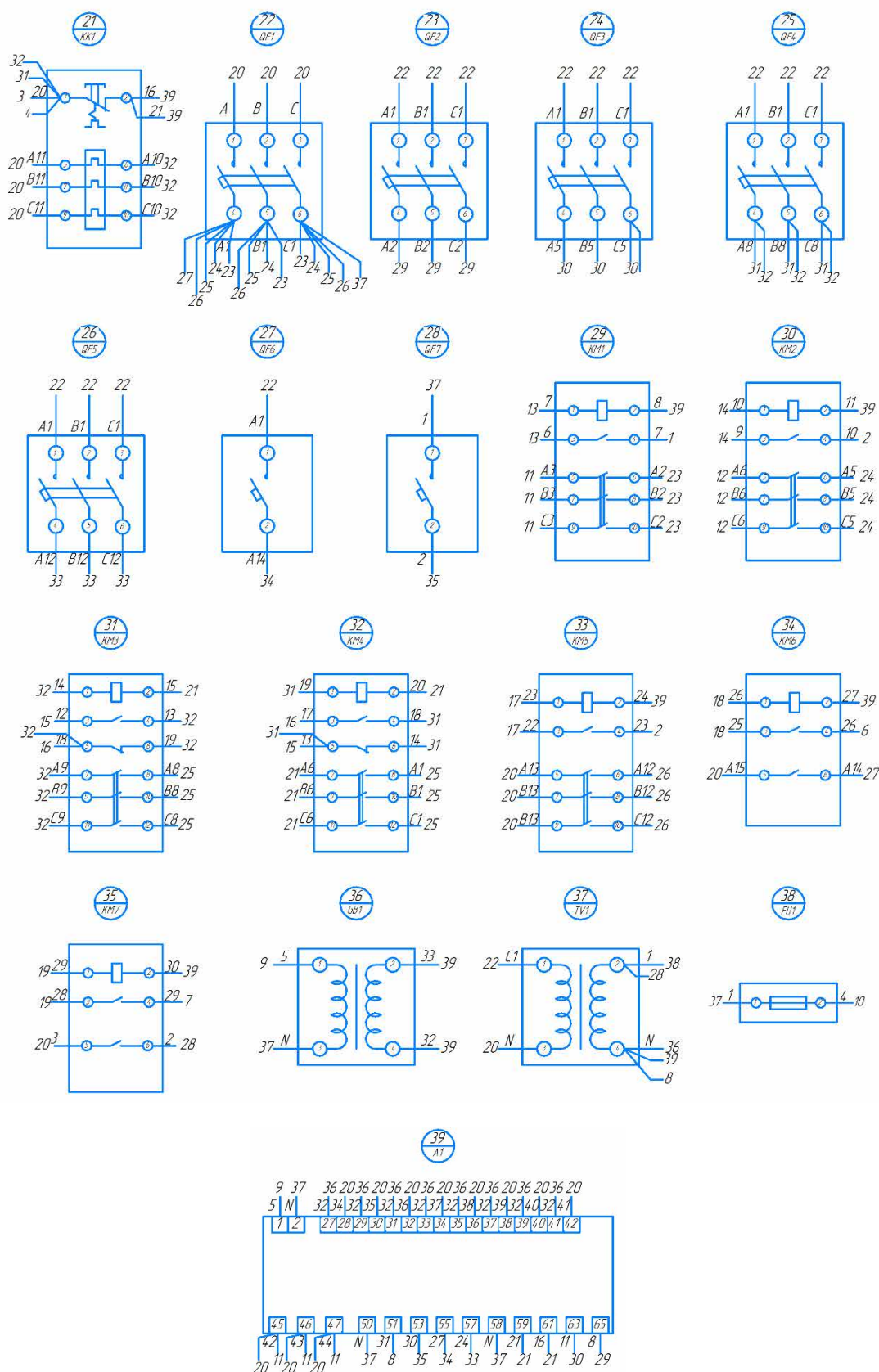


Рис. 4.31. Фрагмент задньої панелі щита схеми з'єднань

Ліва бічна панель

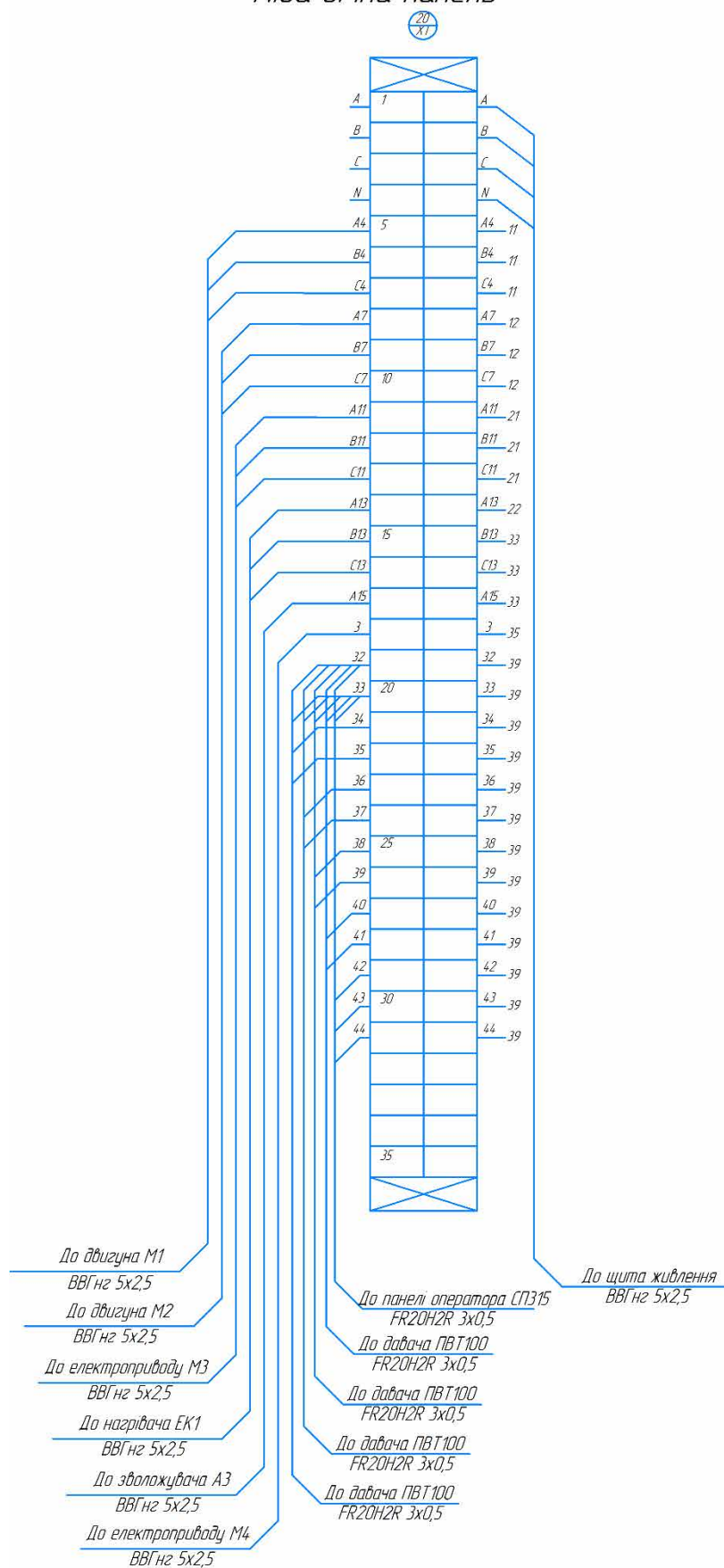


Рис. 4.32. Фрагмент лівої бічної панелі щита схеми з'єднань

4.6 Розробка схеми підключень

Схема підключень призначена для відображення зовнішніх електричних з'єднань між окремими пристроями системи автоматизації. Вона розробляється на основі принципової електричної схеми, специфікації обладнання та плану розташування технічних засобів і використовується під час монтажу та введення системи в експлуатацію.

У розробленій схемі підключень відображено зовнішні з'єднання між програмованим логічним контролером ПЛК160 [U22], панеллю оператора СП315, перетворювачами частоти ПЧВ1, датчиками температури та вологості ПВТ100, виконавчими механізмами, електродвигунами та елементами сигналізації.

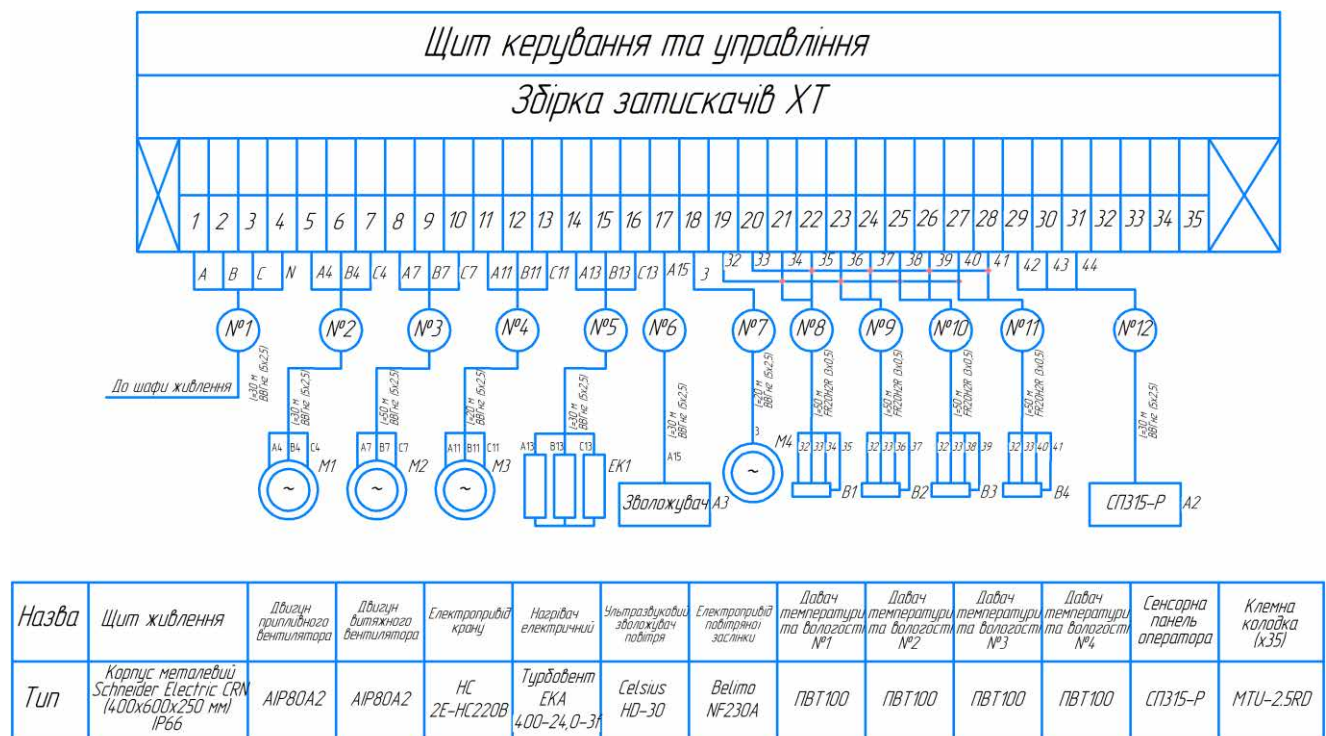


Рис. 4.33. Фрагмент схеми підключень щита керування

4.7 Розробка та вибір щита керування

Щит керування є основним елементом системи автоматизації, призначеним для розміщення апаратури керування, захисту, комутації, сигналізації та програмно-технічних засобів. У щиті розташовуються програмований логічний контролер, елементи живлення, комутаційні апарати, частина силового обладнання, а також засоби індикації та ручного керування.

Для того, щоб правильно обрати щит, потрібно врахувати усі пристрої, що будуть розташовано в середині та на дверці щита керування (див. табл. 4.4).

Таблиця 4.4

Розміри обладнання

Тип	Ширина, мм	Висота, мм	Глибина, мм
Автоматичний вимикач QF1	76	120	70
Автоматичні вимикачі QF2–QF5	54	85	78,5
Автоматичні вимикачі QF6	72	80	75
Автоматичні вимикачі QF7	54	81	67
Теплові реле КК1–КК2	106	45	88
Магнітні пускачі КМ1–КМ6	45	78	80
Магнітні пускачі КМ7	55	78	89
Магнітні пускачі КМ8	45	58	78
Сигнальні лампи HL1–HL9	29	29	53
Кнопка «СТОП» SB1	30	40	75
Кнопки «ПУСК» SB2–SB9	29	29	53
Трипозиційний перемикач SA1	48	48	26
Блок живлення GB1	53	90	60
Контролер А1 ПЛК160[U22]	208	114	75
Перетворювачі частоти UZ1–UZ2 (ПЧВ1)	75	176	168
Клемні затискачі ХТ	5	47	43

Спираючись на розміри обладнання, розрахуємо потрібні параметри щита керування:

- Максимальна робоча ширина задньої панелі: $75 \cdot 2 + 208 = 358$ мм.
- Максимальна робоча висота задньої панелі: $120 + 114 + 176 + 55 + 53 = 518$ мм.
- Максимальна робоча глибина: 250 мм.

На основі цього, обираємо навісний металевий щиток Schneider Electric CRN розміром 400x600x250 з класом захисту IP66 (див. рис. 4.34).



Рис. 4.34. Навісний щит керування

4.8 Розрахунок надійності системи автоматичного керування

Надійність – це здатність технічної системи виконувати задані функції протягом певного проміжку часу із збереженням встановлених параметрів роботи в допустимих межах. Основні терміни та визначення у галузі надійності регламентуються ДСТУ 2860-94 «Надійність техніки. Терміни та визначення». Одним із основних понять теорії надійності є відмова.

Відмова — це подія, внаслідок якої система або окремий її елемент повністю чи частково втрачає працездатність. Імовірність виникнення відмови залежить від часу експлуатації обладнання, умов навколишнього середовища, режимів роботи та конструктивних особливостей елементів системи.

Для оцінки надійності розробленої системи автоматичного керування мікрокліматом овочесховища було виконано розрахунок сумарної інтенсивності відмов елементів, що входять до складу системи. (див. табл. 4.5).

Таблиця 4.5

Інтенсивність відмов елементів схеми

№	Найменування	Кількість	Інтенсивність відмови елемента, 10^{-6} год^{-1}	Результуюча інтенсивність, 10^{-6} год^{-1}
1	Пакетний перемикач	1	0,175	0,175
2	Автоматичні вимикачі	7	0,13	0,91
3	Контактори	7	0,5	3,5
4	Теплові реле	2	0,4	0,8
5	Електродвигуни VAC	4	5,24	20,96
6	Трансформатор	1	0,17	0,17
7	Запобіжник	1	0,5	0,5
8	Лампи (аварійні)	8	0,2	1,6
9	Кнопки	8	0,063	0,504
10	ПЛК	1	0,5	0,5
11	Нагрівальний елемент	1	0,3	0,3
12	Частотний перетворювач векторний	2	1,2	2,4
13	Панель оператора	1	0,8	0,8
14	Джерело живлення 230/24 В	1	1,4	1,4

Сумарна інтенсивність відмов системи визначається за формулою:

$$\lambda_p = \sum_{i=1}^n \lambda_i \quad (4.3)$$

Тоді, результуюча інтенсивність усіх елементів буде становити:

$$\lambda_p = (0,175+0,91+3,5+0,8+20,96+0,17+0,5+1,6+0,504+0,5+0,3+2,4+0,8) = 33,119 \cdot 10^{-6}, \text{ год}^{-1} \quad (4.4)$$

Для оцінювання ймовірності безвідмовної роботи приймаємо час експлуатації системи: $t = 10 \cdot 10^3$ год.

Тоді, ймовірність безвідмовної роботи визначається за експоненціальним законом розподілу:

$$P_{\text{рез}}(10000) = e^{-1 \cdot 33,119 \cdot 10^{-6} \cdot 10^4} = 0,718 \quad (4.5)$$

Отриманий результат свідчить про те, що розроблена система автоматичного керування мікрокліматом овочесховища має достатній рівень надійності та відповідає вимогам експлуатації для промислових систем автоматизації. Проте, можна підвищити надійність схеми, застосовуючи метод навантаженого резервування. Для цього, зарезервуємо частину схеми, а саме двигуни, М1-4 та контактори КМ1-КМ7. На підставі цього, матимемо:

$$\lambda_p = (0,175+0,91+0,8+0,17+0,5+1,6+0,504+0,5+0,3+2,4+0,8) = 8,659 \cdot 10^{-6}, \text{ год}^{-1} \quad (4.6)$$

В цьому випадку, ймовірність безвідмовної роботи становитиме:

$$P_{\text{рез}}(10000) = e^{-1 \cdot 8,659 \cdot 10^{-6} \cdot 10^4} = 0,917 \approx 0,92 \quad (4.7)$$

Результат показав, що використовуючи метод навантаженого резервування для декількох елементів, можна забезпечити хорошу надійність системи в межах 92% на протязі 10000 годин роботи.

РОЗДІЛ 5. РОЗРОБКА ПРОГРАМНОГО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ТА ІНТЕЛЕКТУАЛЬНОЇ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ МІКРОКЛІМАТОМ

5.1. Розробка алгоритму функціонування системи

Алгоритм функціонування системи керування мікрокліматом овочесховища є основою роботи всієї автоматизованої системи та визначає послідовність обробки сигналів від датчиків, аналізу технологічних параметрів і формування керуючих впливів на виконавчі механізми. Розроблений алгоритм забезпечує автоматичне підтримання заданих параметрів температури та вологості повітря у визначених межах.

На початковому етапі роботи системи виконується ініціалізація внутрішніх змінних контролера, налаштування входів та виходів, а також перевірка працездатності основних елементів системи. Після запуску всі виконавчі механізми та датчики переводяться у початковий стан. До моменту натискання кнопки «СТАРТ» система перебуває у режимі очікування.

Після запуску системи програмований логічний контролер починає опитування датчиків температури та вологості, встановлених у сховищі. Отримані значення порівнюються із заданими параметрами мікроклімату, що були встановлені оператором через панель керування або SCADA-систему.

У випадку, якщо поточна температура у сховищі нижча за задану, система вмикає нагрівач для підвищення температури повітря. Одночасно може вмикатись вентиляційний контур та відкриватись повітряна заслінка на визначений кут для забезпечення рівномірного розподілу теплого повітря всередині приміщення.

Аналогічно реалізується контроль вологості в сховищі, тільки вже використовуючи кран для подачі води та зволожувач. При чому контуром регулювання також є система вентиляції.

Після досягнення заданої температури чи вологості, відповідне обладнання автоматично припиняє свою роботу (див. рис. 5.1.)

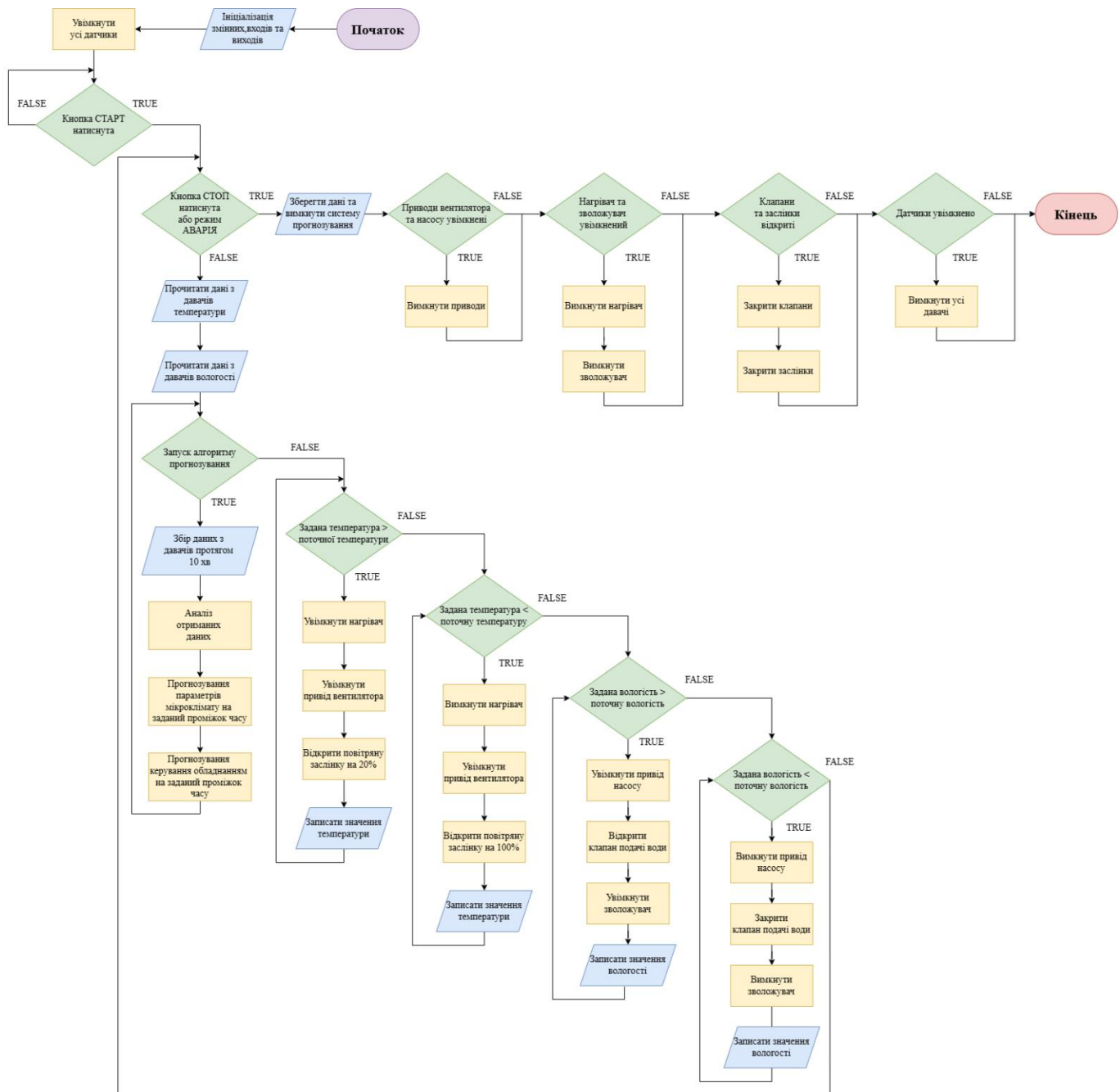


Рис. 5.1. Алгоритм керування системою підтримки мікроклімату в овочесховищі

5.2. Впровадження інтелектуальної системи керування мікрокліматом із використанням SysML-діаграм

Структуру та логіку функціонування інтелектуальної системи керування мікрокліматом найкраще описується мовою системного моделювання SysML, що дозволяє формалізувати процеси функціонування системи, відобразити взаємозв'язки між її компонентами та спростити подальшу реалізацію програмного забезпечення системи керування. Для моделювання системи було використано діаграму діяльності (Activity Diagram) (рис. 5.2) та діаграму блоків (Block Definition Diagram) (рис. 5.3).

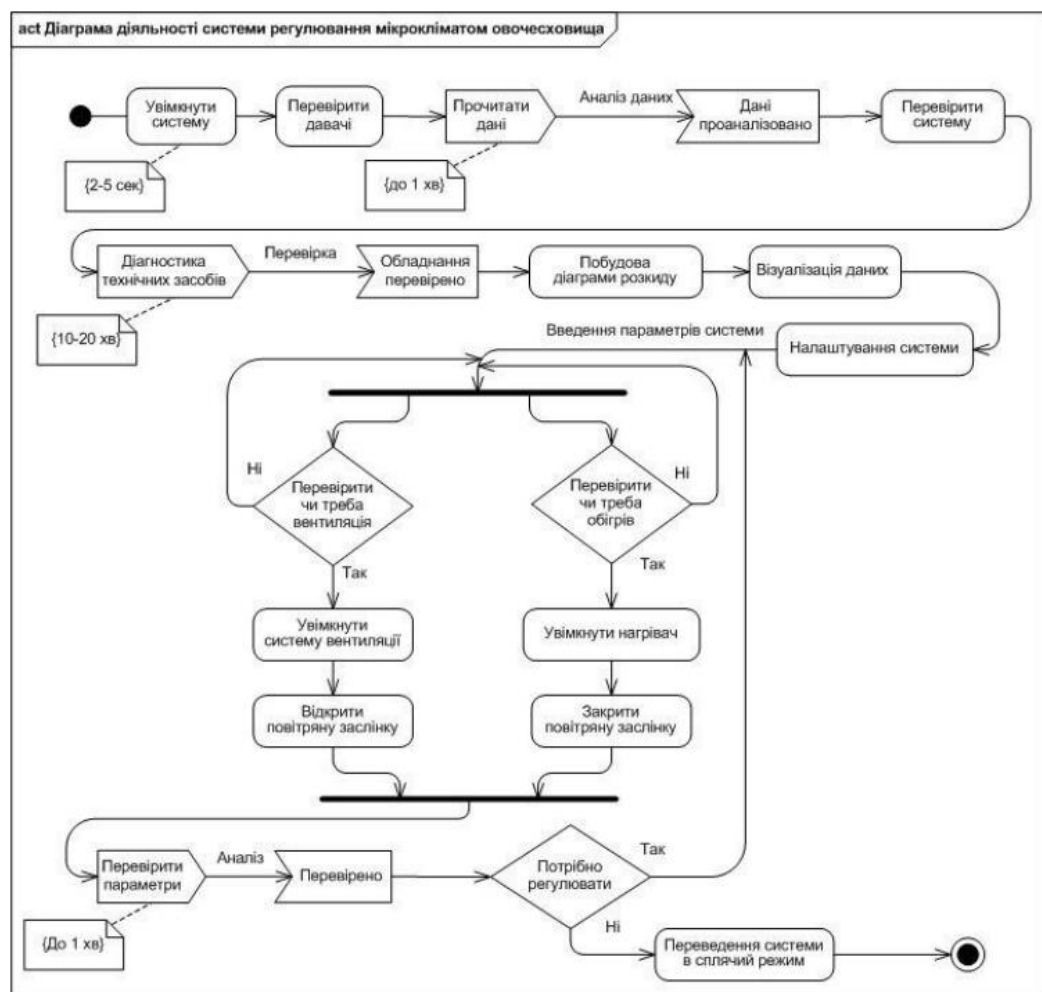


Рис. 5.2. Діаграма діяльності інтелектуальної системи

Діаграма діяльності відображає алгоритм функціонування системи регулювання мікроклімату овочесховища. Після запуску системи виконується перевірка працездатності датчиків та зчитування поточних параметрів мікроклімату, зокрема температури, вологості та стану обладнання.

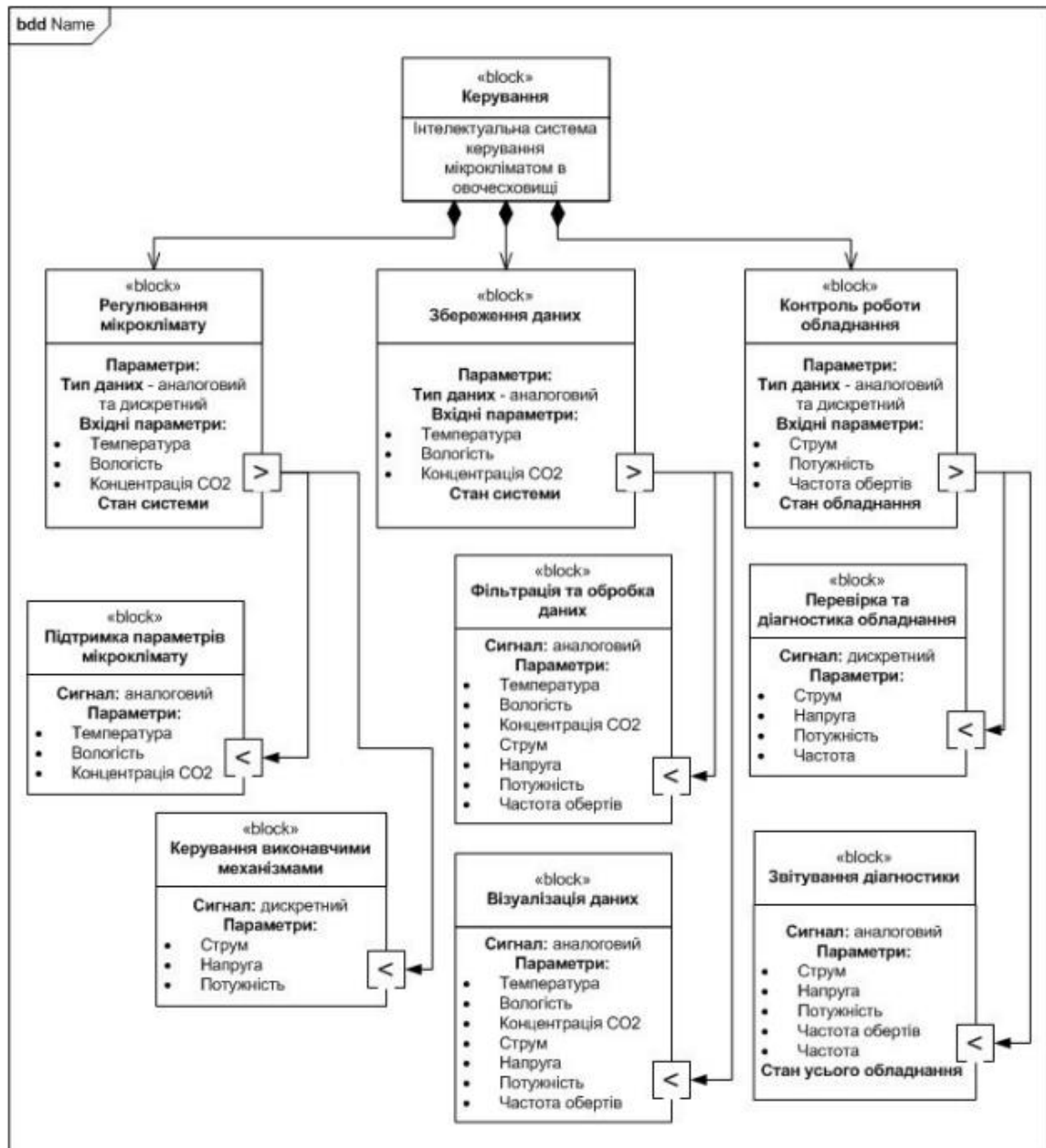


Рис. 5.3. Діаграма блоків інтелектуальної системи

Дана діаграма описує структуру інтелектуальної системи керування мікрокліматом та взаємозв'язки між її основними функціональними модулями.

5.3. Реалізація програми керування системою для контролера

Реалізація програми автоматичного керування системою підтримки мікроклімату в овочесховищі виконувалась у програмному середовищі CoDeSys із використанням мов програмування стандарту IEC 61131-3.

Основна логіка роботи системи була реалізована мовою LD (Ladder Diagram), яка забезпечує наочне представлення логічних зв'язків між елементами системи керування. Фрагменти програми, розробленої мовою LD, наведені на рис. 5.4 та рис. 5.5.

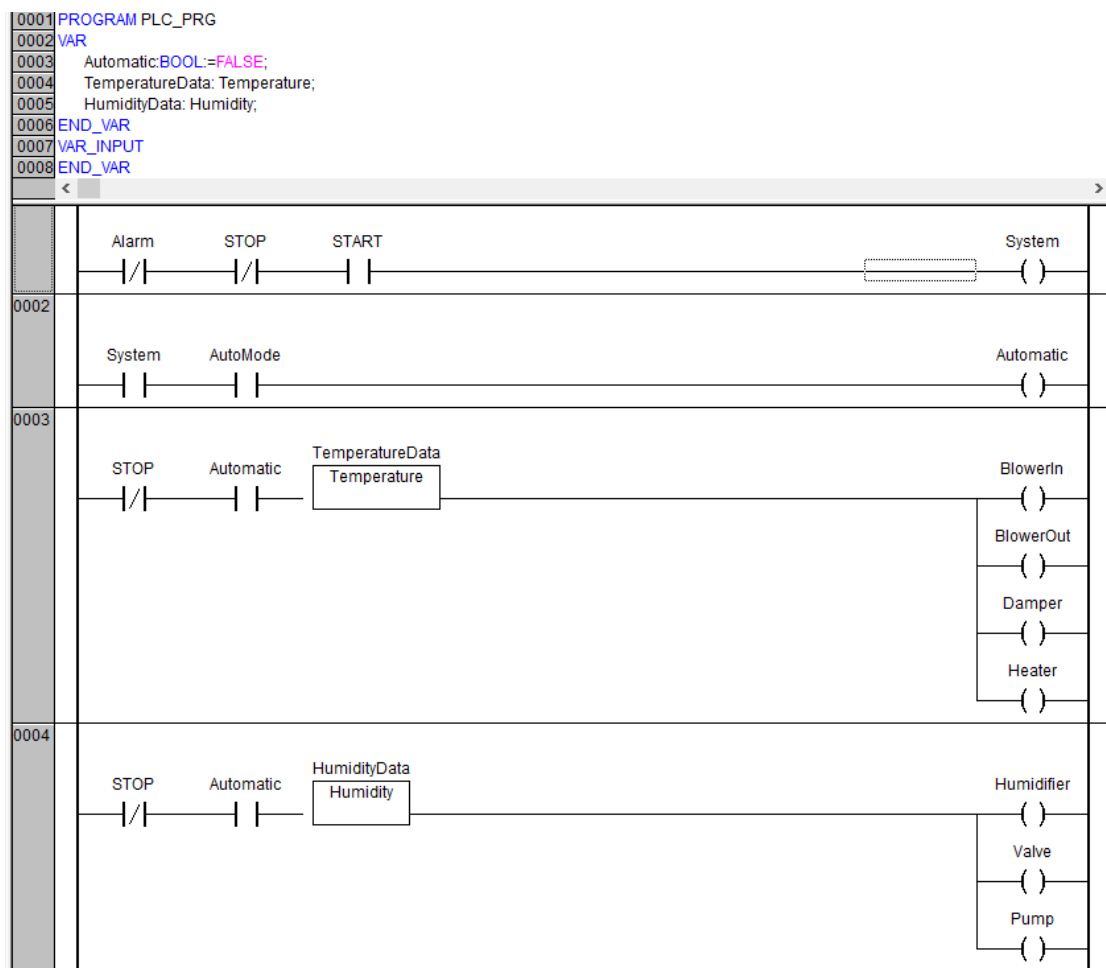


Рис. 5.4. Основна програма автоматичного керування мікрокліматом, реалізована мовою LD у середовищі CoDeSys

Для того, щоб програма коректно працювала з підключеним до програмованого логічного контролера обладнанням, було оголошено глобальні змінні програми. Саме ці змінні використовуються для обробки сигналів від давачів, формування сигналів керування виконавчими механізмами та обміну даними між окремими програмними модулями системи.

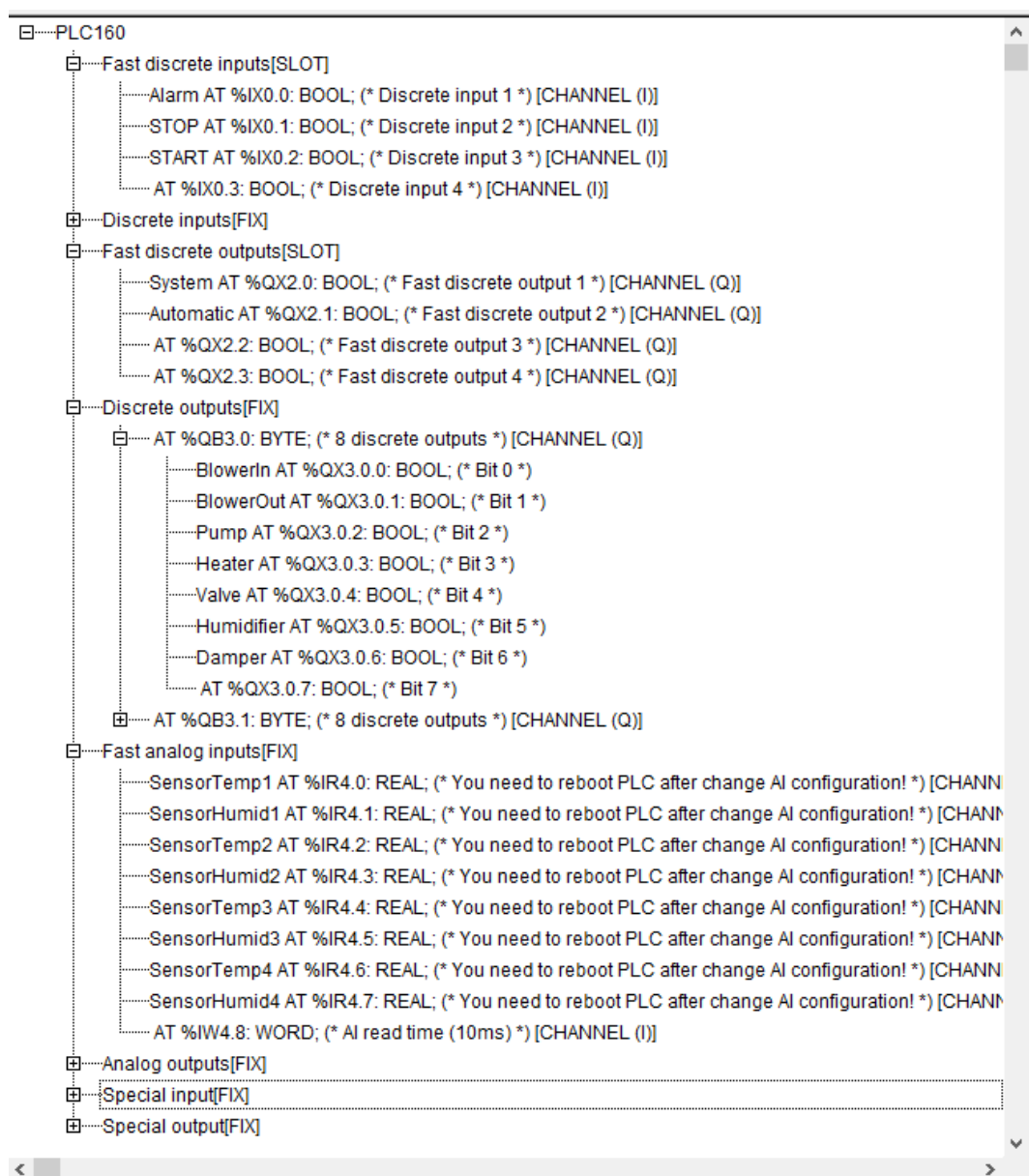


Рис. 5.5. Список оголошених змінних програми у середовищі CoDeSys

Для зручності користування програмою на мові LD було додано дві окремі підпрограми на мові ST для виконання математичної обробки даних температури та вологості відповідно.

Підпрограма TemperatureData реалізує обробку температурних параметрів системи. У програмі виконується аналіз поточних значень температури, порівняння їх із заданими уставками та формування сигналів керування системою вентиляції і нагріву.

```

0001 FUNCTION_BLOCK Temperature
0002 VAR_INPUT
0003 END_VAR
0004 VAR_OUTPUT
0005 END_VAR
0006 VAR
0007     step: INT:= 1;
0008     SetTemperature: REAL:=5;
0009     CurrentTemperature: REAL;
0010     SensorsTemperature: REAL:=0;
0011 END_VAR
0012
0001 Heater:= FALSE;
0002 BlowerIn:= FALSE;
0003 BlowerOut:=FALSE;
0004 Damper:=FALSE;
0005 Pump:=FALSE;
0006 Valve:= FALSE;
0007 Humidifier:=FALSE;
0008 SensorsTemperature:= ((SensorTemp1+SensorTemp2+SensorTemp3+SensorTemp4)/4);
0009 CurrentTemperature:= SensorsTemperature;
0010
0011 CASE step OF
0012     1:
0013         IF SetTemperature > CurrentTemperature THEN
0014             Heater:= TRUE;
0015             BlowerIn:= TRUE;
0016             BlowerOut:= FALSE;
0017             Damper:=TRUE;
0018             CurrentTemperature:= SensorTemperature;
0019         ELSE
0020             step :=2;
0021         END_IF
0022     2:
0023         IF SetTemperature < CurrentTemperature THEN
0024             Heater:= FALSE;
0025             BlowerIn:= TRUE;
0026             BlowerOut:= TRUE;
0027             Damper:=TRUE;
0028             CurrentTemperature:= SensorTemperature;
0029         ELSE
0030             step :=1;
0031         END_IF
0032 END_CASE

```

Рис. 5.6. Підпрограма обробки температурних даних TemperatureData мовою

ST

Підпрограма HumidityData виконує аналіз параметрів вологості повітря у овочесховищі. На основі отриманих значень здійснюється керування системою зволоження та формування сигналів для відкриття або закриття клапанів подачі води, увімкнення та вимкнення зволожувача і системи вентиляції.

```

0001 FUNCTION_BLOCK Humidity
0002 VAR_INPUT
0003 END_VAR
0004 VAR_OUTPUT
0005 END_VAR
0006 VAR
0007     step2: INT:= 1;
0008     SetHumidity: REAL:=94;
0009     CurrentHumidity: REAL;
0010     SensorsHumidity: REAL:=90;
0001 Heater:= FALSE;
0002 BlowerIn:= FALSE;
0003 BlowerOut:=FALSE;
0004 Damper:=FALSE;
0005 Pump:=FALSE;
0006 Valve:= FALSE;
0007 Humidifier:=FALSE;
0008 SensorsHumidity:= ((SensorHumid1+SensorHumid2+SensorHumid3+SensorHumid4)/4);
0009 CurrentHumidity:=SensorsHumidity;
0010
0011 CASE step2 OF
0012     1:
0013         IF SetHumidity > CurrentHumidity THEN
0014             Pump:= TRUE;
0015             Valve:= TRUE;
0016             Humidifier:=TRUE;
0017             BlowerIn:=FALSE;
0018             BlowerOut:=FALSE;
0019             CurrentHumidity:= SensorsHumidity;
0020         ELSE
0021             step2 :=2;
0022         END_IF
0023     2:
0024         IF SetHumidity < CurrentHumidity THEN
0025             Pump:= FALSE;
0026             Valve:= FALSE;
0027             Humidifier:=FALSE;
0028             BlowerIn:=TRUE;
0029             BlowerOut:=TRUE;
0030             CurrentHumidity:= SensorsHumidity;
0031         ELSE
0032             step2 :=1;
0033         END_IF
0034 END_CASE

```

Рис. 5.7. Підпрограма обробки даних вологості HumidityData мовою ST

У випадку аварійного режиму програма автоматично зупиняє роботу усієї системи та подає живлення на аварійну лампу, а також сигнал на інтерфейс SCADA-системи.

5.4. Реалізація SCADA-системи

Для реалізації диспетчерського керування та візуалізації технологічного процесу була розроблена SCADA-система у середовищі Vijeo Citect. Розроблена система забезпечує моніторинг параметрів мікроклімату овочесховища в режимі реального часу, керування виконавчими механізмами, архівування даних та відображення прогнозованих параметрів середовища (див. рис. 5.8–5.9).

На головному екрані SCADA-системи (рис. 5.8) реалізовано графічне відображення технологічного об'єкта у вигляді схеми овочесховища з основними виконавчими механізмами та елементами системи. Інтерфейс дозволяє наочно спостерігати за роботою припливної та витяжної вентиляції, нагрівача, насосного обладнання, повітряних заслінок та системи зволоження.

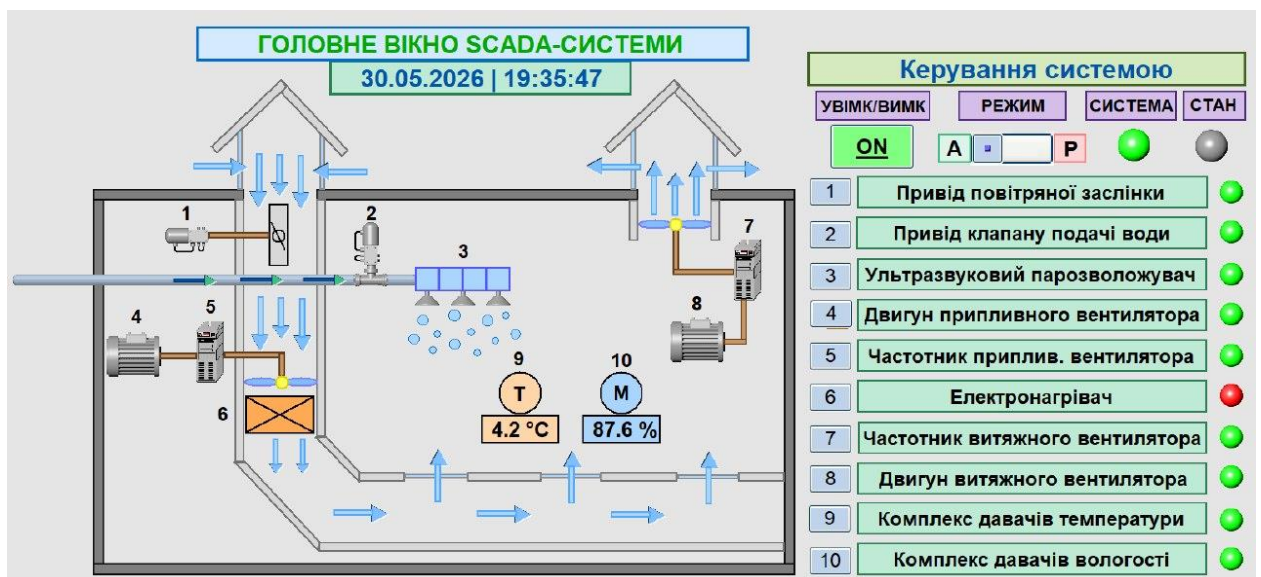


Рис. 5.8. Головне вікно SCADA-системи моніторингу мікроклімату овочесховища

Для покращення візуального сприйняття у системі реалізовано анімацію потоків повітря та подачі води, а також індикацію роботи обладнання за

допомогою світлових елементів і зміни станів об'єктів. Крім того, на екрані відображаються поточні значення температури та вологості повітря у сховищі.

Другий екран SCADA-системи (рис. 5.9) призначений для моніторингу та керування технологічними параметрами системи. На даному екрані відображаються значення температури, вологості, стан обладнання та режим роботи системи за допомогою індикаторних ламп. Також реалізовано панель керування для дистанційного ввімкнення та вимкнення виконавчих механізмів, запуску або зупинки системи та вибору режиму роботи. Для аналізу технологічного процесу передбачено відображення графіків зміни параметрів мікроклімату у часі та результатів алгоритму прогнозування температури й вологості.

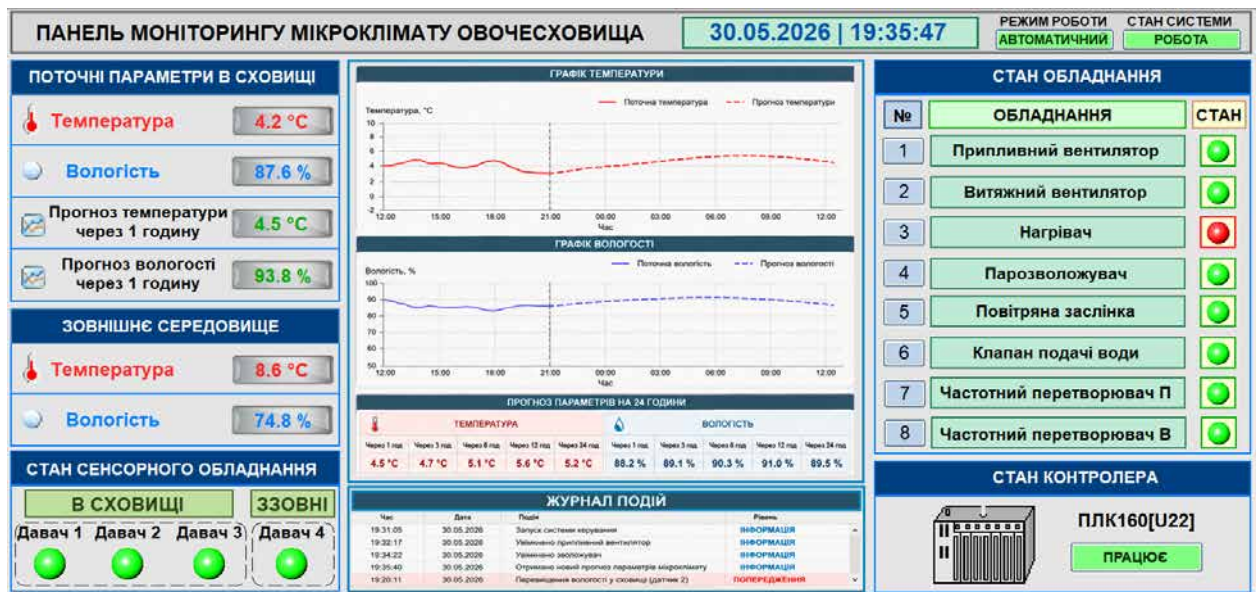


Рис. 5.9. Вікно моніторингу та керування параметрами мікроклімату SCADA-системи

Даний інтерфейс SCADA-системи дозволяє оператору оперативно контролювати стан обладнання, аналізувати зміни параметрів мікроклімату, отримувати повідомлення про аварійні ситуації та контролювати результати роботи алгоритму упередженого прогнозування.

5.5. Розробка мобільного додатку інтегрованої системи моніторингу та керування

Для реалізації дистанційного моніторингу та інтелектуального керування мікрокліматом овочесховища було розроблено структуру інтегрованої інформаційної системи, що об'єднує програмований логічний контролер, сервер обробки даних, SCADA-систему, мобільний додаток та виконавче обладнання (рис. 5.10).

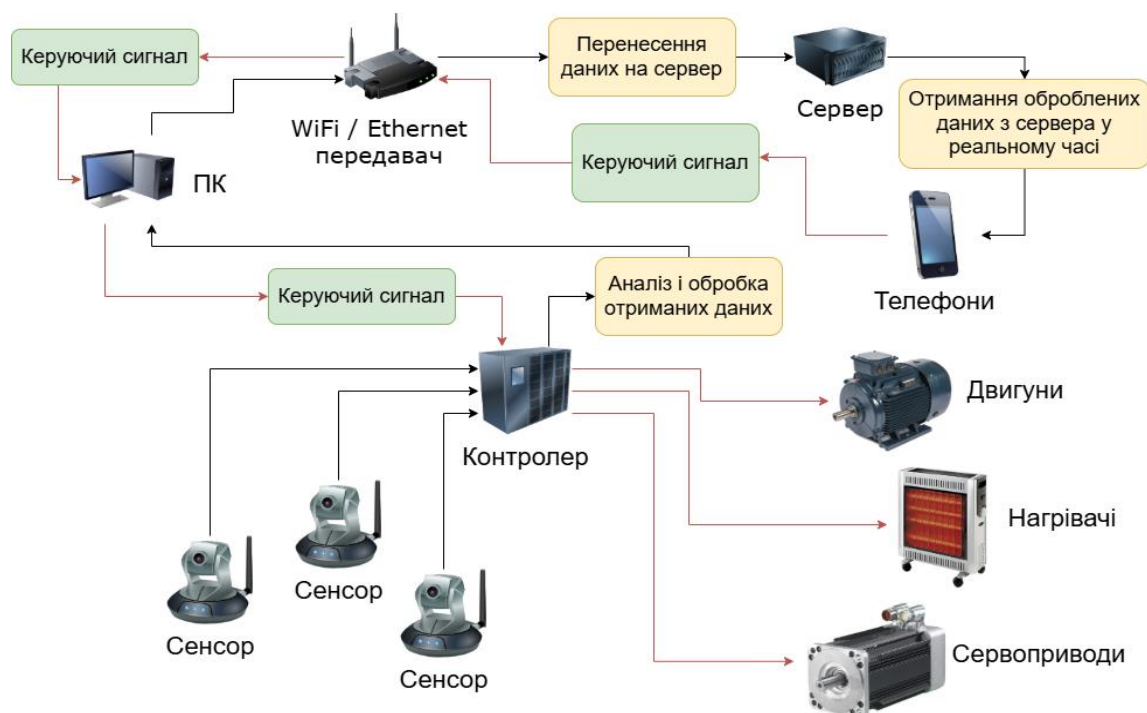


Рис. 5.10. Структурна схема інтегрованої системи моніторингу та керування мікрокліматом овочесховища

Система функціонує за принципом постійного збору технологічних параметрів від датчиків температури, вологості та стану обладнання. Отримані дані надходять до програмованого логічного контролера, де виконується первинна обробка та формування керуючих сигналів для виконавчих механізмів: вентиляторів, нагрівачів, сервоприводів та системи зволоження.

Далі інформація через мережу Ethernet або Wi-Fi передається на сервер, де проводиться аналіз, архівування даних та їх прогнозування. І вже оброблені дані в режимі реального часу передаються до SCADA-системи та мобільного додатку оператора.

Спираючись на структурну схему було розроблено мобільний додаток інтегрованої системи моніторингу та керування. Основним призначенням додатку є надання оператору можливості контролювати технологічні параметри мікроклімату, отримувати інформацію про стан обладнання та виконувати керування системою у реальному часі через мережу Internet.

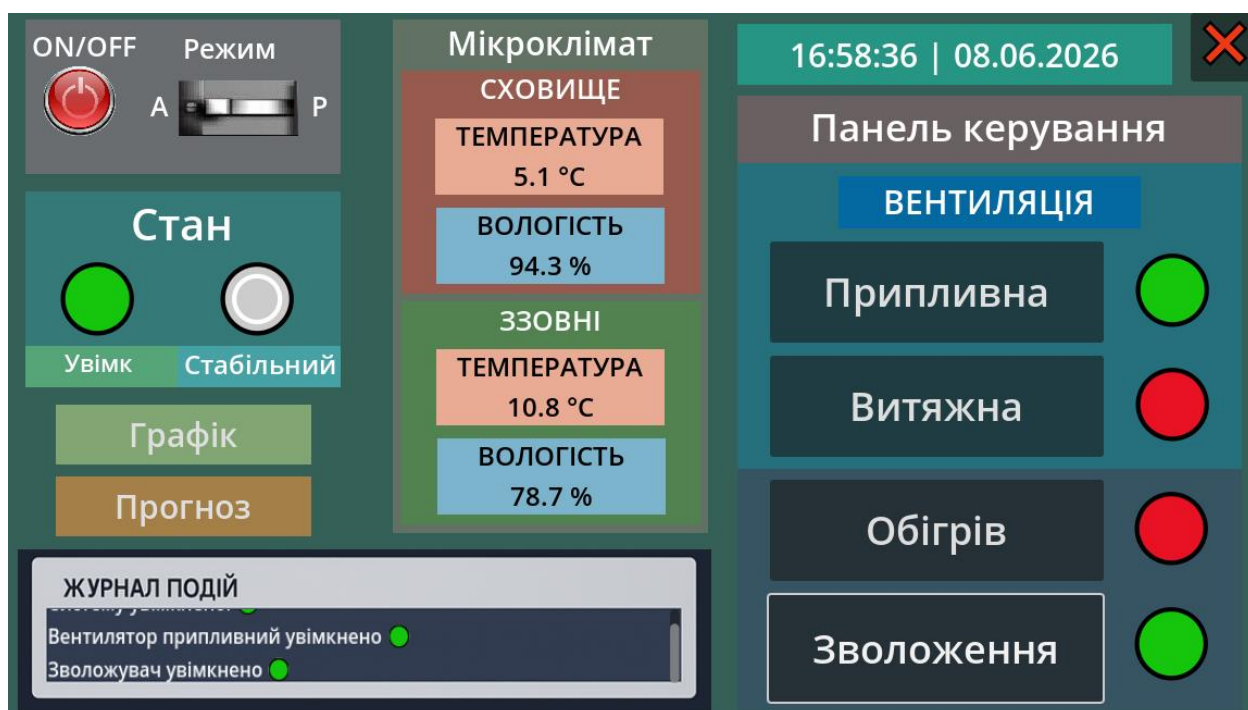


Рис. 5.11. Інтерфейс мобільного додатку дистанційного керування та моніторингу системою

Розроблений мобільний додаток забезпечує відображення поточних параметрів мікроклімату, а саме температури та вологості всередині овочесховища і зовнішнього середовища. Інформація надходить від датчиків температури та вологості через програмований логічний контролер і SCADA-систему.

У верхній частині інтерфейсу реалізовано кнопки вмикання та вимикання системи, а також перемикач режимів роботи «Автоматичний» та «Ручний».

В автоматичному режимі керування здійснюється відповідно до алгоритму роботи контролера та системи прогнозування параметрів мікроклімату. У ручному режимі оператор має можливість самостійно керувати виконавчими механізмами системи.

Для візуального контролю роботи обладнання передбачено світлову індикацію стану окремих контурів системи.

На екрані відображається стан:

- припливної вентиляції;
- витяжної вентиляції;
- системи обігріву;
- системи зволоження.

Зелений колір індикатора відповідає активному стану обладнання, а червоний — вимкненому. Тоді як індикатор стану відповідає за наявність аварії в системі та світиться жовтим.

У нижній частині інтерфейсу реалізовано журнал подій, у якому відображаються повідомлення про зміну стану обладнання, аварійні ситуації та дії оператора. Журнал подій використовується для аналізу роботи системи та спрощує діагностику можливих несправностей.

Окремо в мобільному додатку реалізовано вікно графічного моніторингу параметрів мікроклімату (рис. 5.12), у якому відображаються графіки зміни температури та вологості у часі. Даний графік дозволяє оцінювати ефективність роботи системи автоматичного керування.



Рис. 5.12. Вікно графічного моніторингу параметрів мікроклімату

Також розроблено вікно прогнозування параметрів мікроклімату (рис. 5.13), у якому відображаються прогнозовані значення температури та вологості на певний проміжок часу вперед.

Алгоритм аналізує накопичені значення температури та вологості, після чого формує прогноз зміни параметрів на певний часовий інтервал. На основі прогнозованих значень система може завчасно формувати керуючі сигнали для ввімкнення вентиляції, обігріву або зволоження, що дозволяє підвищити енергоефективність та стабільність мікроклімату. Результати прогнозування відображаються у вигляді графіків у мобільному додатку та SCADA-системі.



Рис. 5.13. Вікно прогнозування параметрів мікроклімату

Для зберігання технологічних параметрів та журналу подій використовується сервер баз даних Microsoft SQL Server. База даних забезпечує накопичення, обробку та архівування інформації, отриманої від контролера та SCADA-системи.

За допомогою середовища SQL Server Management Studio реалізовано графічне представлення таблиць даних, у яких зберігаються значення температури, вологості, стану обладнання та аварійних повідомлень. Це дозволяє виконувати аналіз роботи системи, формувати звіти та використовувати накопичені дані для роботи алгоритмів прогнозування.

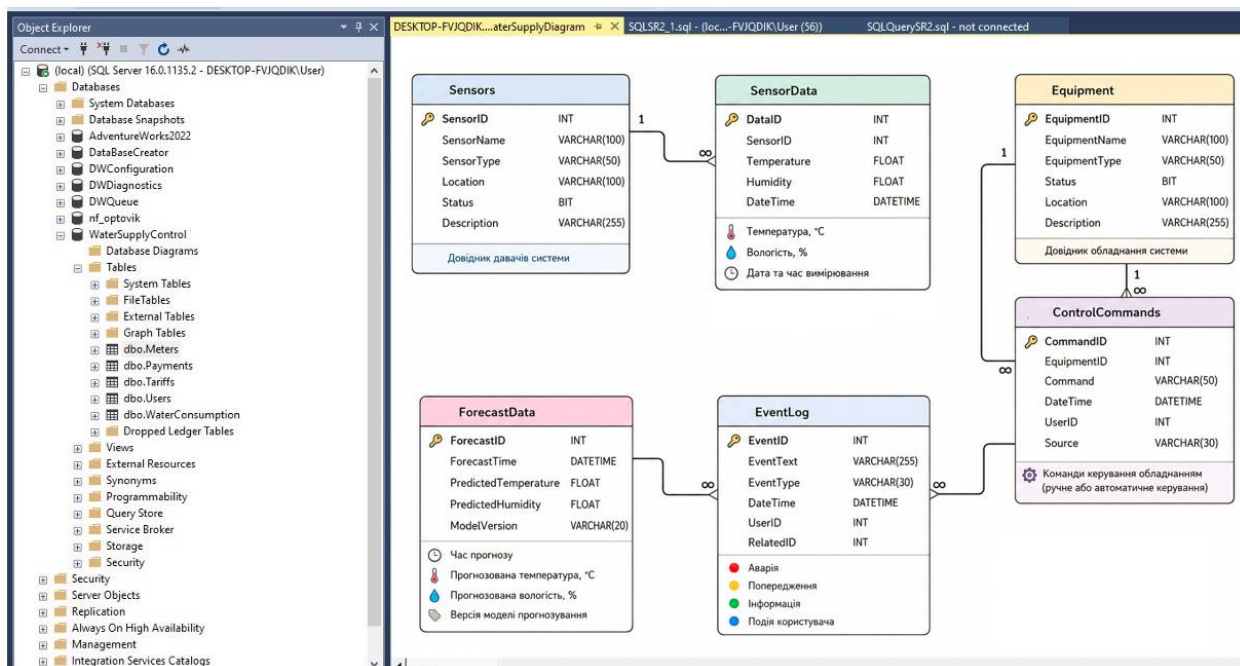


Рис. 5.14. Графічне представлення таблиць даних системи

5.6. Реалізація алгоритму упередженого прогнозування параметрів мікроклімату

Для підвищення ефективності керування мікрокліматом овочесховища у системі реалізовано алгоритм упередженого прогнозування параметрів середовища. На відміну від класичних систем автоматичного регулювання, які реагують лише після зміни параметрів, запропонований алгоритм дозволяє прогнозувати майбутні значення температури та вологості і завчасно формувати керуючі сигнали для виконавчих механізмів. Це забезпечує більш стабільне підтримання мікроклімату, зменшення коливань параметрів та підвищення енергоефективності системи.

Алгоритм прогнозування реалізовано мовою Python із використанням бібліотек TensorFlow, Keras, NumPy, Pandas та Scikit-learn. Модель працює за

принципом регресійного аналізу та здійснює прогнозування параметрів мікроклімату на основі накопичених даних із системи моніторингу. До вхідних параметрів моделі належать значення температури та вологості всередині овочесховища, параметри зовнішнього середовища, стан виконавчих механізмів та часові характеристики технологічного процесу. Результатом роботи моделі є прогноз температури та вологості на визначений проміжок часу.

Структурна схема роботи алгоритму прогнозування наведена на рис. 5.15. Система отримує дані від давачів через контролер та SCADA-систему, після чого інформація передається до сервера бази даних SQL Server. Далі дані обробляються алгоритмом прогнозування, який формує прогнозовані значення параметрів мікроклімату та передає результати до SCADA-системи й мобільного додатку для подальшої візуалізації та формування керуючих сигналів.

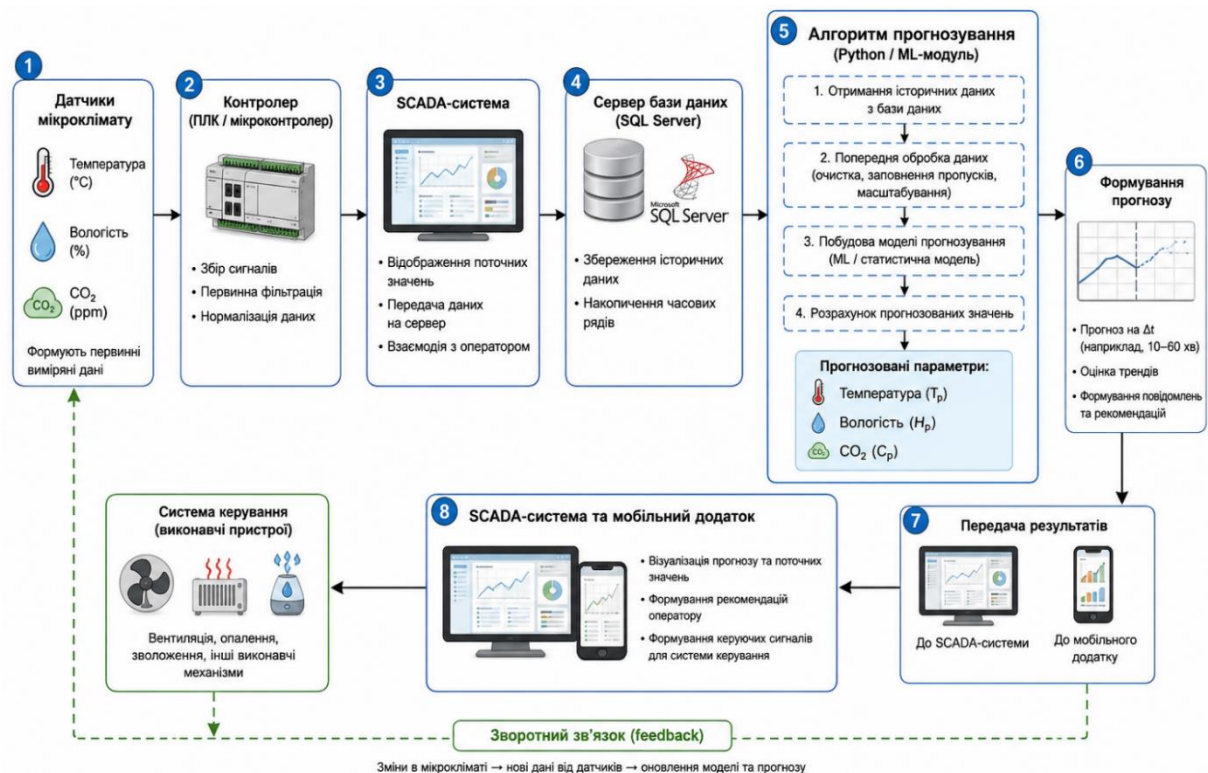


Рис. 5.15. Структурна схема алгоритму прогнозування параметрів мікроклімату

Перед початком навчання моделі виконувалась попередня обробка даних, яка включала фільтрацію помилкових значень, нормалізацію параметрів та формування навчальної вибірки. Накопичені дані були розділені на навчальну, валідаційну та тестову вибірки у співвідношенні 70%, 15% та 15% відповідно. Навчання нейронної мережі виконувалось на історичних даних зміни температури та вологості, отриманих у процесі роботи системи.

Фрагмент програмної реалізації алгоритму прогнозування у онлайн середовищі Google Colab наведено на рис. 5.16.

```

Epoch 92/100
91/91 ————— 0s 3ms/step - loss: 9.5786e-04 - mae: 0.0245 - val_loss: 0.0011 - val_mae: 0.0258
Epoch 93/100
91/91 ————— 0s 3ms/step - loss: 9.6500e-04 - mae: 0.0246 - val_loss: 9.9806e-04 - val_mae: 0.0249
Epoch 94/100
91/91 ————— 0s 3ms/step - loss: 9.7879e-04 - mae: 0.0248 - val_loss: 0.0011 - val_mae: 0.0265
Epoch 95/100
91/91 ————— 0s 3ms/step - loss: 0.0010 - mae: 0.0253 - val_loss: 0.0010 - val_mae: 0.0248
Epoch 96/100
91/91 ————— 0s 3ms/step - loss: 9.6648e-04 - mae: 0.0245 - val_loss: 0.0010 - val_mae: 0.0255
Epoch 97/100
91/91 ————— 0s 3ms/step - loss: 0.0010 - mae: 0.0252 - val_loss: 0.0011 - val_mae: 0.0266
Epoch 98/100
91/91 ————— 0s 3ms/step - loss: 9.7032e-04 - mae: 0.0246 - val_loss: 0.0011 - val_mae: 0.0266
Epoch 99/100
91/91 ————— 0s 3ms/step - loss: 0.0010 - mae: 0.0257 - val_loss: 9.8629e-04 - val_mae: 0.0247
Epoch 100/100
91/91 ————— 0s 3ms/step - loss: 0.0010 - mae: 0.0254 - val_loss: 9.9411e-04 - val_mae: 0.0251
10/10 ————— 0s 4ms/step - loss: 9.0619e-04 - mae: 0.0244

Середня абсолютна похибка MAE: 0.0244
10/10 ————— 0s 8ms/step

ПРОГНОЗОВАНІ ЗНАЧЕННЯ:

Запис 1
Реальна температура: 4.95 °C
Прогнозована температура: 5.36 °C
Реальна вологість: 86.72 %
Прогнозована вологість: 85.84 %
-----
Запис 2
Реальна температура: 5.10 °C
Прогнозована температура: 5.21 °C
Реальна вологість: 82.88 %
Прогнозована вологість: 81.72 %
-----
Запис 3
Реальна температура: 7.03 °C
Прогнозована температура: 7.23 °C
Реальна вологість: 92.11 %
Прогнозована вологість: 92.26 %
-----
Запис 4
Реальна температура: 6.55 °C
Прогнозована температура: 6.34 °C
Реальна вологість: 93.77 %
Прогнозована вологість: 92.76 %
-----
Запис 5
Реальна температура: 2.85 °C
Прогнозована температура: 3.06 °C
Реальна вологість: 88.39 %
Прогнозована вологість: 88.71 %
-----
Запис 6
Реальна температура: 3.62 °C
Прогнозована температура: 3.98 °C
Реальна вологість: 89.79 %
Прогнозована вологість: 90.39 %
-----
Запис 7
Реальна температура: 6.80 °C
Прогнозована температура: 6.58 °C
Реальна вологість: 82.68 %
Прогнозована вологість: 83.39 %
-----
Запис 8
Реальна температура: 5.31 °C
Прогнозована температура: 5.74 °C
Реальна вологість: 87.76 %
Прогнозована вологість: 86.47 %
-----

```

Рис. 5.16. Результат реалізації алгоритму прогнозування на мові Python

У програмі реалізовано зчитування даних із бази даних, формування навчальної вибірки, створення моделі нейронної мережі, процес навчання та побудову прогнозованих значень параметрів мікроклімату.

Для оцінки ефективності роботи алгоритму використовувалось порівняння реальних та прогнозованих значень температури і вологості. Результати роботи моделі наведено у вигляді графіків на рис. 5.17 та 5.18. Аналіз отриманих результатів показав, що використання алгоритму прогнозування дозволяє своєчасно активувати систему вентиляції, обігріву або зволоження ще до виходу параметрів за допустимі межі.

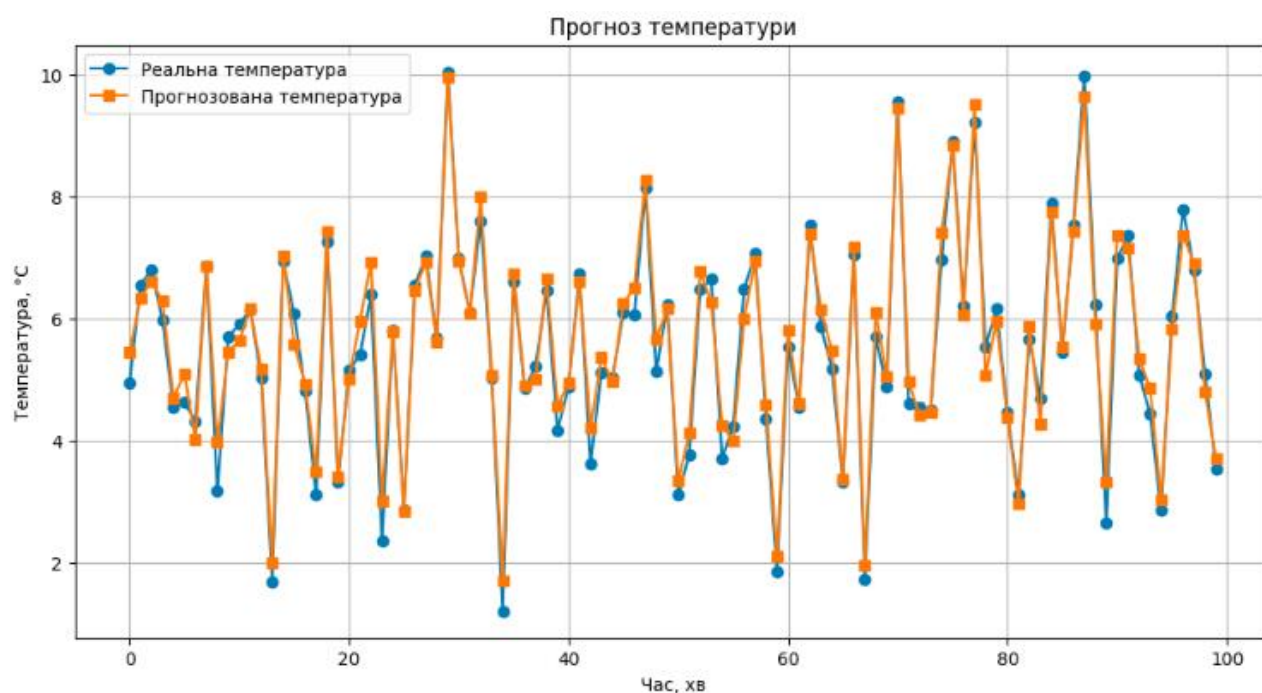


Рис. 5.17. Графіки реальних та прогнозованих значень температури

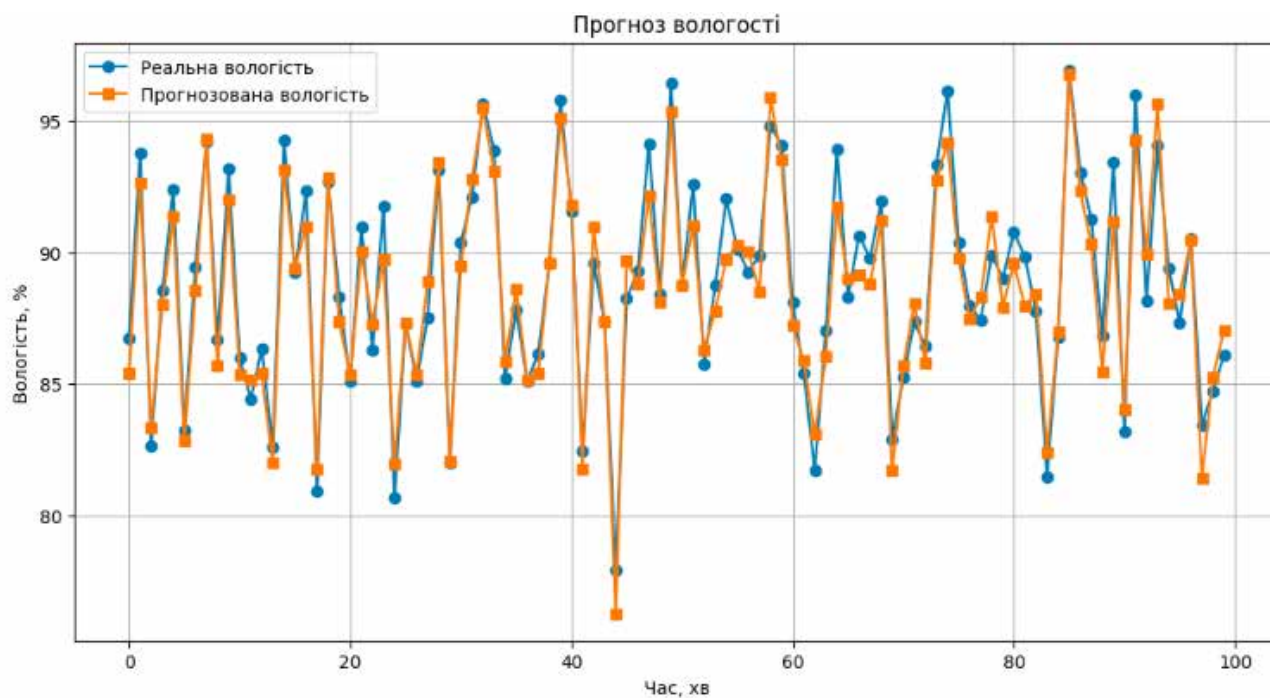


Рис. 5.18. Графіки реальних та прогнозованих значень вологості

Використання алгоритмів упередженого прогнозування у складі комп'ютерно-інтегрованої системи керування мікрокліматом дозволяє підвищити стабільність технологічного процесу зберігання овочевої продукції, зменшити енергоспоживання та покращити якість підтримання параметрів мікроклімату у сховищі.

РОЗДІЛ 6. ОХОРОНА ПРАЦІ ТА ТЕХНІКА БЕЗПЕКА

6.1. Охорона праці

Основною метою охорони праці є забезпечення безпечних умов праці персоналу, попередження виробничого травматизму та професійних захворювань, а також створення безпечних умов експлуатації електротехнічного обладнання.

Основними небезпечними факторами є ураження електричним струмом, короткі замикання, перегрів електрообладнання, підвищена вологість повітря у приміщенні овочесховища, а також електромагнітні завади, що виникають під час роботи перетворювачів частоти та електродвигунів. Додаткову небезпеку становлять рухомі частини вентиляційного обладнання та нагрівальні елементи системи підтримання температурного режиму.

Під час експлуатації системи необхідно підтримувати нормативні параметри мікроклімату в приміщенні щитової та овочесховища. Температура та вологість повинні відповідати допустимим значенням для роботи електротехнічного обладнання. При цьому, у приміщенні повинна бути забезпечена достатня вентиляція та освітленість робочої зони.

Розроблена система автоматичного керування мікрокліматом овочесховища включає промислове габаритне електрообладнання, що працюють від мережі змінного струму напругою 220/380 В.

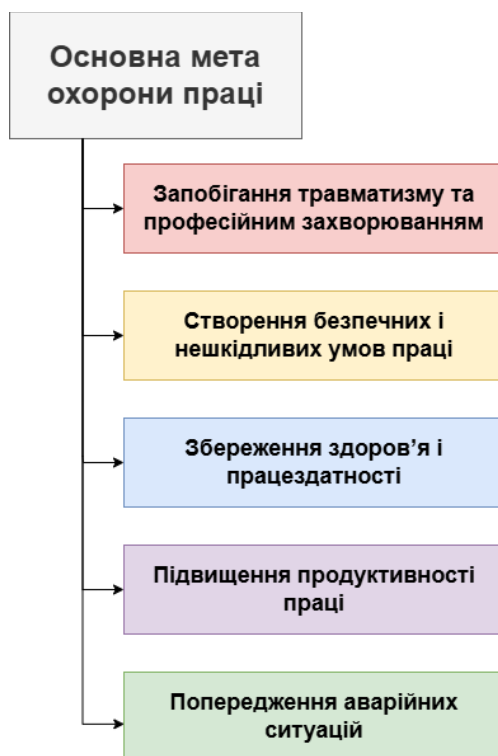


Рис. 6.1. Структурна схема основної мети охорони праці

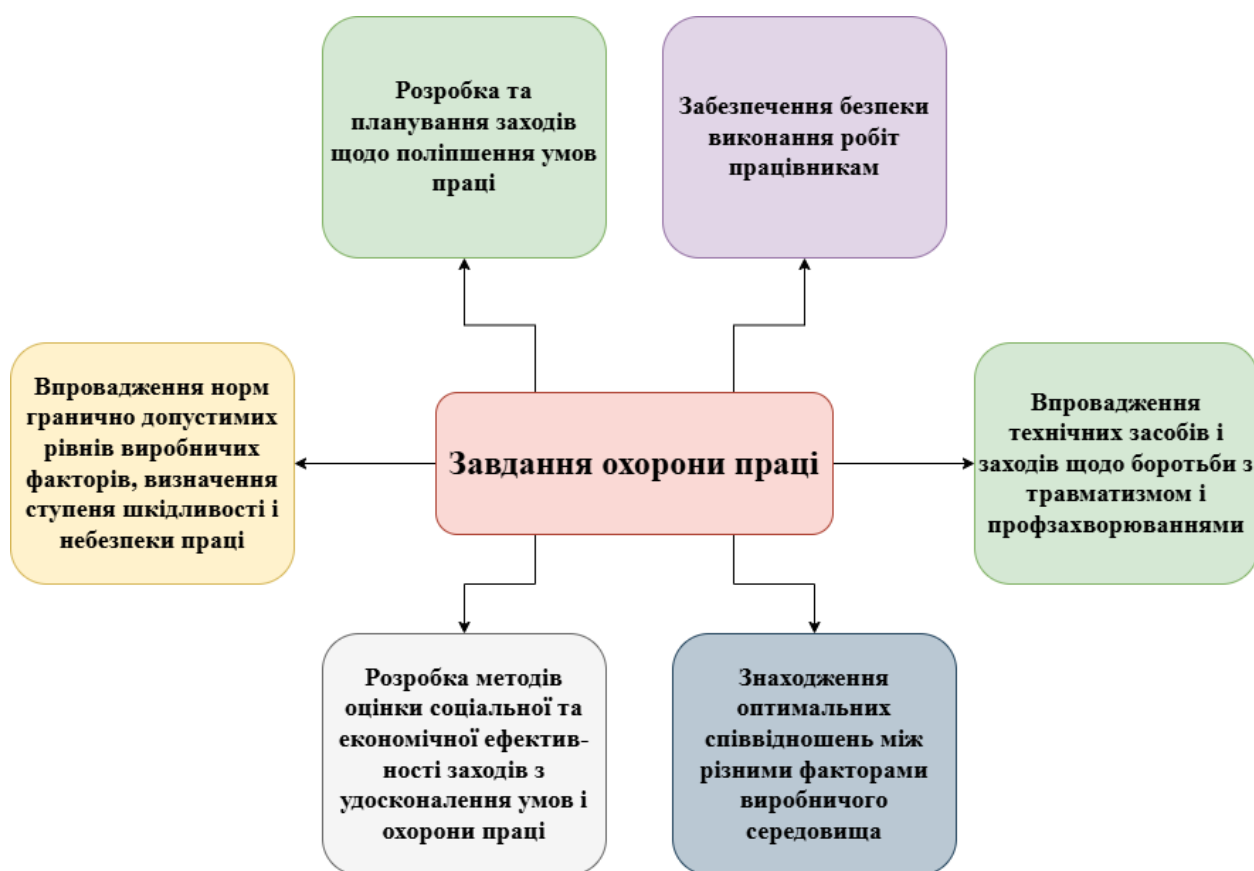


Рис. 6.2. Структурна схема основної мети охорони праці

У зв'язку з цим основними небезпечними факторами під час експлуатації системи є можливість ураження електричним струмом, виникнення коротких замикань, перегрів обладнання, а також вплив підвищеної вологості у приміщенні овочесховища.

Важливим елементом охорони праці є забезпечення пожежної безпеки. Причинами виникнення пожежі можуть бути короткі замикання, перегрів кабелів, несправність електродвигунів або перетворювачів частоти. Для зменшення ризику займання використовуються автоматичні вимикачі, кабелі з відповідним перерізом, а також негорючі матеріали для монтажу обладнання. У приміщенні повинні бути встановлені первинні засоби пожежогасіння, зокрема порошкові або вуглекислотні вогнегасники.

До роботи з системою автоматичного керування допускаються лише особи, які пройшли інструктаж з охорони праці, ознайомлені з принципом роботи обладнання та мають відповідну групу допуску з електробезпеки. Проведення монтажних, ремонтних або налагоджувальних робіт допускається лише після повного відключення системи від електромережі та перевірки відсутності напруги на струмопровідних частинах.

6.2. Вимоги безпеки обслуговуючого персоналу

Вимоги безпеки до працівників, які обслуговують електроустановки та системи автоматизації, регулюються низкою стандартів і нормативних актів, основними з яких є Правила технічної експлуатації електричних станцій і мереж, а також державні стандарти (ДСТУ) і міжнародні вимоги.

Основна мета цих вимог - забезпечити безпеку працівників при виконанні робіт з електричними установками та автоматизованими системами, щоб запобігти нещасним випадкам, ураженню електричним струмом, пожежам та іншим небезпекам.

До експлуатації та обслуговування системи допускаються лише особи, які пройшли вступний та первинний інструктаж з охорони праці.

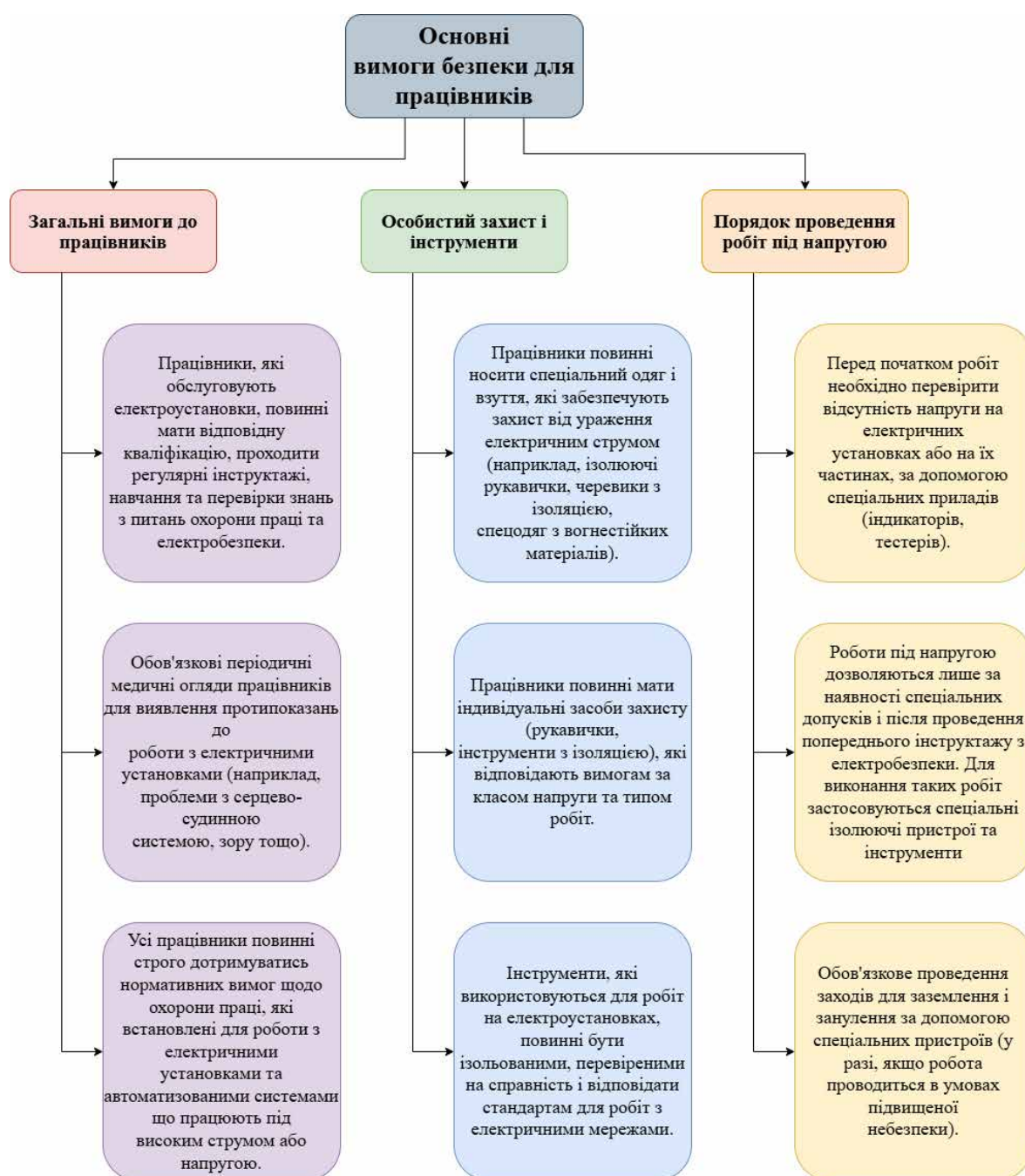


Рис. 6.3. Структурна схема вимог безпеки праці

Важливо зазначити, що кожен працівник повинен пройти відповідний інструктаж з електробезпеки, зокрема, про порядок включення/вимкнення обладнання, заходи у разі аварії, використання засобів індивідуального захисту, надання першої допомоги. При цьому робота проводиться за чітко розробленими інструкціями, схемами і планами обслуговування електроустаткування, автоматизованих систем.

6.3. Визначення опору заземлюючого пристрою

Для створення безпечних умов під час роботи з електроустановками повинні бути збудовані пристрої для заземлення та заземлені металеві частини електрообладнання, які можуть опинитися під напругою внаслідок пошкодження ізоляції. Можливий струм замикання на землю і, відповідно, небезпечність ураження, залежить від величини струму.

Відповідно до вимог Правил улаштування електроустановок (ПУЕ), для електроустановок напругою до 1000 В опір захисного заземлення не повинен перевищувати 4 Ом. Наявність ефективного заземлення забезпечує спрацювання захисної апаратури при виникненні аварійного режиму.

Для системи автоматизації овочесховища приймається контур заземлення, що складається з вертикальних сталевих електродів, з'єднаних між собою металевою смугою. Така конструкція є найбільш поширеною для промислових та виробничих об'єктів і забезпечує необхідну надійність та довговічність системи заземлення.

Для заземлення електрообладнання використовуються сталеві труби діаметром 35-50 мм та кутникова сталь (40х40-60х60 мм) з товщиною стінок не менше 3,5 мм і довжиною 2,5-3 м.

Проведемо розрахунок загального опіру заземлюючого пристрою:

$$R = \frac{\rho}{2\pi L} \ln \frac{2L}{d}, \quad (6.1)$$

де:

- ρ - питомий опір ґрунту, Ом·м;
- L - довжина електрода, м;
- d - діаметр електрода, м.

Для розрахунку приймаємо:

- питомий опір ґрунту $\rho=100$ Ом·м;
- довжину вертикального електрода $L=3$ м;
- діаметр електрода $d=0,05$ м.

Підставивши значення у формулу 6.1, отримаємо:

$$R = \frac{100}{2 \cdot 3,14 \cdot 3} \ln \frac{2 \cdot 3}{0,05} = 25,4 \text{ Ом} \quad (6.2)$$

Отримане значення перевищує допустиме значення 4 Ом, тому для зменшення опору необхідно використовувати декілька вертикальних електродів, з'єднаних між собою сталеву смугою у єдиний контур заземлення.

При використанні групового заземлення із декількох електродів загальний опір заземлюючого пристрою визначається за формулою:

$$R_{\varepsilon} = \frac{R}{n \cdot \eta}, \quad (6.3)$$

де:

- n - кількість електродів;
- η - коефіцієнт використання електродів.

Приймаємо:

- кількість електродів $n=8$;
- коефіцієнт використання $\eta=0,8$.

Тоді:

$$R_{\varepsilon} = \frac{25,4}{8 \cdot 0,8} = 3,97 \approx 4 \text{ Ом.} \quad (6.4)$$

Отримане значення є нормативним, тому для забезпечення необхідного рівня електробезпеки доцільно використовувати дані параметри заземлення.

РОЗДІЛ 7. ТЕХНІКО-ЕКОНОМІЧНЕ ОБГРУНТУВАННЯ

7.1. Розрахунок техніко-економічної ефективності автоматизації систем керування технологічними процесами у сільськогосподарському виробництві

Впровадження автоматизованих систем керування технологічними процесами у АПК дозволяє підвищити ефективність використання енергоресурсів, покращити якість зберігання продукції, зменшити втрати врожаю та скоротити витрати на обслуговування обладнання. Автоматизація системи керування мікрокліматом овочесховища забезпечує стабільне підтримання температури, вологості та повітрообміну, що позитивно впливає на збереження продукції та економічні показники підприємства.

Економічна ефективність автоматизації визначається шляхом порівняння капітальних витрат на впровадження системи із очікуваними експлуатаційними витратами та додатковим прибутком, отриманим у результаті підвищення ефективності зберігання продукції.

Сукупні витрати розраховуються за формулою 7.1:

$$B_{3B} = C + E_H \cdot K_B, \quad (7.1)$$

де:

- B_{3B} – сукупні витрати, грн/рік;
- C – щорічні експлуатаційні витрати, грн/рік;
- E_H – номінальний коефіцієнт ефективності капіталовкладень, 1/рік;
- K_B – капітальні витрати, грн.

До складу експлуатаційних витрат входять:

1. витрати на електроенергію;
2. витрати на оплату праці персоналу;
3. амортизаційні відрахування;
4. витрати на ремонт та технічне обслуговування.

Для системи автоматизації приймаються такі вихідні дані:

- потужність вентиляційного обладнання, виконавчих механізмів та керуючих елементів - 45,1 кВт;
- тривалість роботи системи - 24 год/добу;
- кількість робочих днів - 360 днів на рік;
- тариф на електроенергію - 4,32 грн/кВт·год.

Річне споживання електроенергії:

$$W = 45,1 \cdot 24 \cdot 360 = 389664 \text{ кВт/рік} \quad (7.2)$$

Вартість електроенергії за 1 робочий рік:

$$C_e = 389664 \cdot 4,32 = 1683350 \text{ грн} \quad (7.3)$$

Капітальні витрати включають:

- вартість ПЛК;
- вартість датчиків;
- перетворювачі частоти;
- шафу керування;
- електромонтажне обладнання;
- транспортні та монтажні витрати.

Таблиця 7.1

Загальна вартість обладнання системи

№	Найменування обладнання	Кількість	Орієнтовна ціна за одиницю, грн	Загальна вартість, грн
1	ПЛК160 [U22]	1	25050	25050
2	Панель оператора СП315	1	45144	45144
3	Перетворювач частоти ПЧВ1-2К2-В	2	21036	42072
4	Датчик температури та вологості ПВТ100	4	7794	31176
5	Блок живлення HDR-60-24 Mean Well	1	840	840
6	Автоматичний вимикач QF1	1	1684	1684
7	Автоматичні вимикачі QF2– QF7	6	263	1578
8	Магнітні пускачі КМ1–КМ8	8	668	5344
9	Теплові реле КК1–КК2	2	3050	6100
10	Сигнальні лампи HL1–HL9	9	50	450
11	Кнопка СТОП SB1	1	137	137
12	Кнопки керування SB2–SB9	8	36	288
13	Трипозиційний перемикач SA1	1	398	398
14	Металевий щит IP54 400×600×250	1	5308	5308
15	Клеми, кабельні канали	30	15,60	468
16	DIN-рейки	3	120	360
17	Кабельні ВВНГ	1 (100 м)	116	11600
18	Кабельні FR2OH2R	2 (200 м)	49	9800
19	Двигуни вентиляторів	2	3653	7306
20	Вентилятори	2	2970	5940
21	Нагрівальний елемент ЕК1	1	40248	40248
22	Повітряна заслінка	1	3708	3708
23	Ультразвуковий зволожувач повітря Celsius HD-30	1	100000	100000
24	Привід Belimo NF230A	1	13800	13800

Продовження таблиці 7.1

25	Кульовий кран з електроприводом 2Е-НС220В-1/2	1	2800	2800
----	---	---	------	------

Спираючись на дані з таблиці 7.1, загальна вартість обладнання становитиме:

$$K_{OB} = 352799 \text{ грн} \quad (7.4)$$

Транспортні та торгові витрати становлять 11% від вартості обладнання:

$$K_{TP} = 0,11 \cdot 352799 = 38808 \text{ грн} \quad (7.5)$$

Монтажні роботи приймаються у розмірі 17% від вартості обладнання:

$$K_M = 0,17 \cdot 352799 = 59976 \text{ грн} \quad (7.6)$$

Інші витрати складають 6% від вартості обладнання:

$$K_{IH} = 0,06 \cdot 352799 = 21168 \text{ грн} \quad (7.7)$$

Тоді загальні капітальні витрати становлять:

$$K = 352799 + 38808 + 59976 + 21168 = 472751 \text{ грн} \quad (7.8)$$

Визначивши загальні витрати, перейдемо до визначення щорічних амортизаційних відрахувань. У відстоках амортизація становить 13% від вартості обладнання:

$$Ca = 0,13 \cdot 352799 = 45864 \text{ грн} \quad (7.9)$$

Витрати на ремонт та технічне обслуговування становлять 18% від вартості обладнання:

$$C_p = 0,18 \cdot 352799 = 63504 \text{ грн} \quad (7.10)$$

Витрати на проведення інженерами монтажних робіт системи приймаємо за 60000 грн. Тобто $З_p = 60000$ грн.

Тоді, заробітна плата обслуговування приймемо 50% від оплати за проведення монтажних робіт. Так як обслуговуючий персонал розділяється на бригади, для обслуговування системи буде 2 бригади по 3 чоловіка. Тобто, загалом 6 працівників. Тоді загальні витрати на оплату праці:

$$C_z = 60000 \cdot 0,5 \cdot 6 = 180000 \text{ грн} \quad (7.11)$$

Тоді, річні експлуатаційні витрати становитимуть:

$$C = C_e + (C_z \cdot 12) + C_a + C_p = 1683350 + 2160000 + 45864 + 63504 = 3952718 \text{ грн} \quad (7.12)$$

Визначивши витрати, перейдемо до розрахунку прибутку. Приймаємо, що прибуток від зберігання усієї овочевої продукції становить приблизно 15000 грн за добу. Тоді річний додатковий прибуток:

$$P_p = 15000 \cdot 360 = 5400000 \text{ грн} \quad (7.13)$$

Тоді, термін окупності системи становить:

$$T = K/P = 472751/12000 = 40 \text{ днів} = 1,3 \text{ місяць} = 0,11 \text{ років}. \quad (7.14)$$

Для оцінювання інвестиційної ефективності системи визначається чиста приведена вартість NPV:

$$NPV = \sum_{t=1}^n \frac{CF_t}{(1+r)^t} - K \quad (7.15)$$

де:

- CF_t - грошовий потік у році t , грн;
- r - ставка дисконту;
- n - розрахунковий період експлуатації системи, років;
- K - капітальні витрати на впровадження системи, грн.

Для розрахунку приймаємо:

- капітальні витрати $K=472751$ грн;
- ставка дисконту $r=15\% = 0,15$;
- термін експлуатації системи $n=5$ років;
- щорічний грошовий потік $CF_t = 1450000$ грн.

Проведемо розрахунок дисконтованого грошового потоку для кожного року.

Таблиця 7.1

Розрахунок NPV

Рік експлуатації	Грошовий потік (CF_t), грн	Коефіцієнт дисконтування	Дисконтований грошовий потік, грн
1	1450000	0,869	1260050
2	1450000	0,756	1096200
3	1450000	0,658	954100
4	1450000	0,572	829400
5	1450000	0,497	720650
Сумарний дисконтований потік:			4860400

Отже, отримане значення $NPV > 0$, що свідчить про високу економічну ефективність впровадження автоматизованої системи керування мікрокліматом овочесховища. Це означає, що протягом розрахункового періоду експлуатації система повністю компенсує вкладені інвестиції та забезпечує додатковий прибуток підприємству.

ВИСНОВОК

У ході виконання кваліфікаційної магістерської роботи проаналізовано технологію зберігання овочевої продукції та технологічні процеси у овочесховищі. Наведено приклади існуючих систем автоматизації, визначено їх проблеми та шляхи вдосконалення.

Здійснено інформаційний аналіз об'єкта керування, результат якого показав, що для кожної культури необхідні свої параметри мікроклімату. Основною плодоовочевою культурою для зберігання було обрано картоплю, температура зберігання якої становить 4°C , а вологість повітря – 94%.

На основі технологічних відомостей, реалізовано параметричну та функціональну схеми автоматизації.

Використовуючи програмне середовище MATLAB Simulink, побудовано імітаційні моделі контролю температури і вологості в овочесховищі та в зволожувачі. На базі цих моделей проведено дослідження об'єкта, результатом якого стало визначення передатних функцій по каналах температури та вологості, а також параметри оптимального управління системою.

Спираючись на визначені передатні функції, регулювання параметрів температури та вологості проводитиметься використанням пропорційно-інтегрально-диференційного алгоритму керування, так як даний алгоритм компенсує статичну похибку, проводить регулювання системи за 130 секунд та забезпечує задовільні показники якості перехідного процесу. На основі аналітичних розрахунків визначено оптимальні налаштування ПІД-регулятора: коефіцієнт передачі пропорційної складової, $K_p=102,247$, інтегральної, $K_i=0,243$ та диференційної, $K_d=13280$.

Проведено синтез цифрового ПД-регулятора та дослідження на стійкість та якість. Результат дослідження регулятора методом Z-перетворення на площині показав, що система є стійкою.

Показники якості перехідного процесу показали, що система не має статичної похибки, перерегулювання та коливання. Крім того, час регулювання становить 130 секунд, що свідчить про достатньо швидку реакцію системи.

У якості регулюючого елементу, а саме контролера було обрано програмований логічний контролер ПЛК160 [U22] завдяки наявності великої кількості аналогових входів та виходів, виходу до мережі Ethernet та легкості у використанні.

Важливою частиною системи є забезпечення безаварійної експлуатації обладнання, для якого було підібрано пускозахисну апаратуру таку як автоматичні вимикачі, теплові реле, магнітні пускачі, запобіжник, трансформатор, перемикачі, кнопки та сигнальні лампи. Також, окремо під силовий та керуючий контури підібрано відповідні кабелі, що забезпечують захист від перегріву та електромагнітних перешкод відповідно.

Розроблено комплект схем автоматизації, що включає функціональну, електричну принципову, щита керування, з'єднань та підключень обладнання. Дані схеми оформлено за державним стандартом та містять таблиці специфікацій використаних технічних засобів, а також перелік підключень і роз'ємів.

На базі технології, функціональної схеми та обраного обладнання реалізовано алгоритм керування комп'ютерно-інтегрованої системи з алгоритмами упередженого прогнозування. Спираючись на алгоритм, було розроблено програму для контролера ПЛК160[U22] на мові Structured Text та Ladder Diagrams.

Для забезпечення ефективного дистанційного моніторингу та керування мікрокліматом овочесховища було розроблено SCADA-систему з людино-машинним інтерфейсом, а також мобільний додаток для віддаленого доступу до системи через мережу Internet. Розроблене програмне забезпечення забезпечує візуалізацію технологічних параметрів у режимі реального часу, контроль температури та вологості, а також дозволяє оператору здійснювати оперативне керування виконавчими механізмами системи, незалежно від місця перебування.

Особливістю розробленої системи є використання алгоритмів упередженого прогнозування на основі методів штучного інтелекту. Програмна модель працює за принципом регресійного аналізу та дозволяє прогнозувати зміну температури й вологості у сховищі на певний проміжок часу наперед. На основі отриманих прогнозованих значень система визначає оптимальні режими роботи вентиляції, нагріву та зволоження.

Не менш важливим було визначення вимог охорони праці для працівників та розрахунок опору заземлення для системи. Результат показав необхідність щонайменше 8 електродів для досягнення необхідного рівня електробезпеки.

У межах техніко-економічного обґрунтування проведено розрахунок капітальних витрат на придбання засобів автоматизації, контрольно-вимірювальних приладів та електротехнічного обладнання. Також визначено річні експлуатаційні витрати, пов'язані зі споживанням електроенергії, технічним обслуговуванням та експлуатацією системи.

За результатами розрахунків визначено, що термін окупності проекту становить 40 діб, тоді як щорічний чистий дохід становить приблизно 1450000 грн. А отже, проведений економічний аналіз свідчить про економічну доцільність впровадження розробленої системи.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. ПРОЄКТУВАННЯ СИСТЕМ АВТОМАТИЗАЦІЇ ДЛЯ АПК / [В. П. Лисенко, І. М. Болбот, В. А. Наливайко та ін.]. – Київ: ФОП Ямчинський О.В., 2022. – 626 с.

2. ОСНОВНІ МЕТОДИ ТА МЕТОДИКИ ПІДГОТОВКИ КВАЛІФІКАЦІЙНОЇ РОБОТИ МАГІСТРІВ / В.П. Лисенко, І.М. Болбот, С.А. Шворов, В.В. Коваль, Н.А. Заєць, Т.І. Лендєл, К.В. Наконечна, А.І. Болбот Основні методи та методики підготовки кваліфікаційної роботи магістрів: Навчальний посібник. – Київ, 2023. – 462 с.

3. Комп'ютерне моделювання процесів та систем. Чисельні методи.: підруч. для здобувачів ступеня бакалавра за спец. "Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології" / С. П. Вислоух [та ін.] ; Нац. техн. ун-т України "Київ. політехн. ін-т ім. Ігоря Сікорського". - Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2021. - 225 с. : рис., табл. - Бібліогр.: с. 221-225.

4. Комп'ютерне моделювання процесів і систем. Методи оптимізації: підруч. для здобувачів ступеня бакалавра за спец. "Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології" / С. П. Вислоух [та ін.] ; [відп. ред. Антонюк В.] ; Нац. техн. ун-т України "Київ. політехн. ін-т ім. Ігоря Сікорського". - Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2023. - 264 с. : рис., табл. - Бібліогр.: с. 261-264.

5. Діагностування, обслуговування і ремонт електрообладнання: навчальний посібник для студентів вищих навчальних закладів. / В.В.Коробський, І.М.Болбот, М.Т.Лут, В.А.Наливайко – К.: ФОП Ямчинський О.В., 2021 – 510 с.

6. ТИПОВІ ТЕХНОЛОГІЧНІ ПРОЦЕСИ І ХОЛОДИЛЬНЕ ОБЛАДНАННЯ ДЛЯ ЗБЕРІГАННЯ РОСЛИННОЇ ПРОДУКЦІЇ: МОДЕЛЮВАННЯ, ДИНАМІЧНІ РЕЖИМИ, КЕРУВАННЯ / Монографія [В. О. Грищенко]. – Київ: ЦП «КОМПРИНТ», 2018. – 227 с.

7. Енергоефективне управління виробництвом в тепличних комбінатах продукції заданої якості [Текст] : монографія / Лисенко Віталій Пилипович [та ін.]. - Київ : Ямчинський О. В. [вид.], 2021. - 379 с. : рис., табл. - Бібліогр.: с. 316-344 . - 100 прим. - ISBN 978-617-8049-91-1

8. Лисенко В.П., Шворов С.А. Моделювання та оптимізація систем керування: навчальний посібник. – К.: Наук світ, 2021.

9. Методи моделювання та оптимізації систем та процесів : лаб. практикум для спец. "Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології" / [уклад.: О. М. Тачиніна та ін.] ; Нац. авіац. ун-т. - Київ : НАУ, 2022.

10. ЕЛЕКТРОПРИВОД ВИРОБНИЧИХ МАШИН І МЕХАНІЗМІВ / [О. Ю. Синявський, В. В. Савченко, Ю. М. Лавріненко, Д. Г. Войтюк, В. Я. Бунько, В. Ю. Рамш.]. – Київ: ФОП Ямчинський О. В., 2020. – 444 с.

11. АНАЛІЗ ПАРАМЕТРІВ АВТОМАТИЧНОЇ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ - Розділ 1. ОСНОВИ АВТОМАТИЗАЦІЇ СІЛЬСЬКОГОСПОДАРСЬКОГО ВИРОБНИЦТВА - Навчальний посібник - Література - Автоматизація технологічних процесів і САК. Автоматизація технологічних процесів і САК - Головна сторінка. URL: https://atpicak.ucoz.ua/load/navchalnij_posibnik/rozdil_1/1_7_analiz_parametriv_avtomatichnoji_sistemi_keruvannja/3-1-0-237/.

12. Vukladach. URL: https://vukladach.pp.ua/MyWeb/manual/elektroenergetuka/Avtomotuzacia_tehnologihnuh_procesiv_i_sustemu_avtomatuhnogo_keryvanna/6/6.1.htm/.

13. ПЛК160[U22]. Програмований логічний контролер - Опис. Контрольновимірювальні прилади і промислова автоматизація виробництва | АКУТЕК Україна. URL: <https://aqteck.ua/ua/programovani-logichni-kontrolery/plk160-m02-programovanyj-logichnyj-kontroler>.

14. ПВТ100. Промисловий давач вологості та температури опівітря - Опис. Контрольно-вимірювальні прилади і промислова автоматизація виробництва | АКУТЕК Україна. URL: <https://aqteck.com.ua/ru/datchiki/pvt100-datchik-temperaturi-i-vlazhnosti>.

15. ПЧВ1 та ПЧВ2. Ефективні промислові перетворювачі частоти - Габаритні та установчі розміри. *Контрольно-вимірювальні прилади і промислова автоматизація виробництва | АКУТЕК Україна.* URL: <https://aqteck.ua/ua/pryvidna-tehnika/pchv1-2-peretvorjuvach-chastoty-vektornyj-gabarytni-ta-ustanovchi-rozmiry>.

16. СПЗхх. Сенсорні панелі оператора - Опис. *Контрольно-вимірювальні прилади і промислова автоматизація виробництва | АКУТЕК Україна.* URL: <https://aqteck.ua/ua/paneli-operatora/sp3xx-sensorni-paneli-operatora>.

17. Купити Щит Schneider Electric CRN B400XIII600XГ250 IP66 + Монтажна плата в Києві | ElectroShop. *ElectroShop.* URL: <https://electroshop.com.ua/kyiv/shit-schneider-electric-crn-v400hsh600hg250-ip66-montazhnaya>.

18. NF230A-S2 Привід повітряної заслінки з вбудованою поворотною пружиною і дод. контактом BELIMO: продаж, ціна у Запоріжжі. Комплектуючі для систем вентиляції від "ТД Фаворит" - 756129889. URL: <https://tdfavorit.com.ua/ua/p756129889-nf230a-privod-vozdushnoj.html>.

19. Електродвигун АИР80А2 1,5 кВт 3000 об/хв 220/380В - розміри, характеристики, ціна. *Электродвигатели Украины*. URL: <https://xn--80addceesni0axzh6mb.xn--j1amh/obshheprom/elektrodivigatel-air80a2/>.

20. Нагрівач електричний круглий Турбовент ЕКК 400-12,0: продаж, ціна у Києві. Калорифери від "ТУРБОВЕНТ" - 1499962523. Вентиляційні системи | Купити промислові вентилятори | turbovent.com.ua. URL: <https://turbovent.com.ua/ua/p1499962523-nagrevatel-elektricheskijkruglyj.html>.

21. Вентс КРВ 450 - Заслінки - VENTS Україна. Vents Україна. URL: <https://vents.ua/product/krv-450/#description>.

22. Вентилятор ВО-6-300 (ВО-12-300) №4 эл/дв 0,25/1500 - Вентиляторный завод "Горизонт". *Вентиляторный завод «Горизонт»*. URL: https://www.vent.com.ua/ru/ventilyator-vo-6-300-4-rv-ehldv-0-25_1500/.

23. Кран кульовий з електроприводом 2Е НС220В, 1/2", 220В, 5Вт, 10 (16) бар, 7 сек, сумісний з Ajax (2Е-НС220В-1/2). *ERC Ukraine*. URL: <https://erc.ua/ware/356925-2e-motorized-water-valve-hc220b-1-2-220v-5w-10-16-bar-7-sec/buy>.

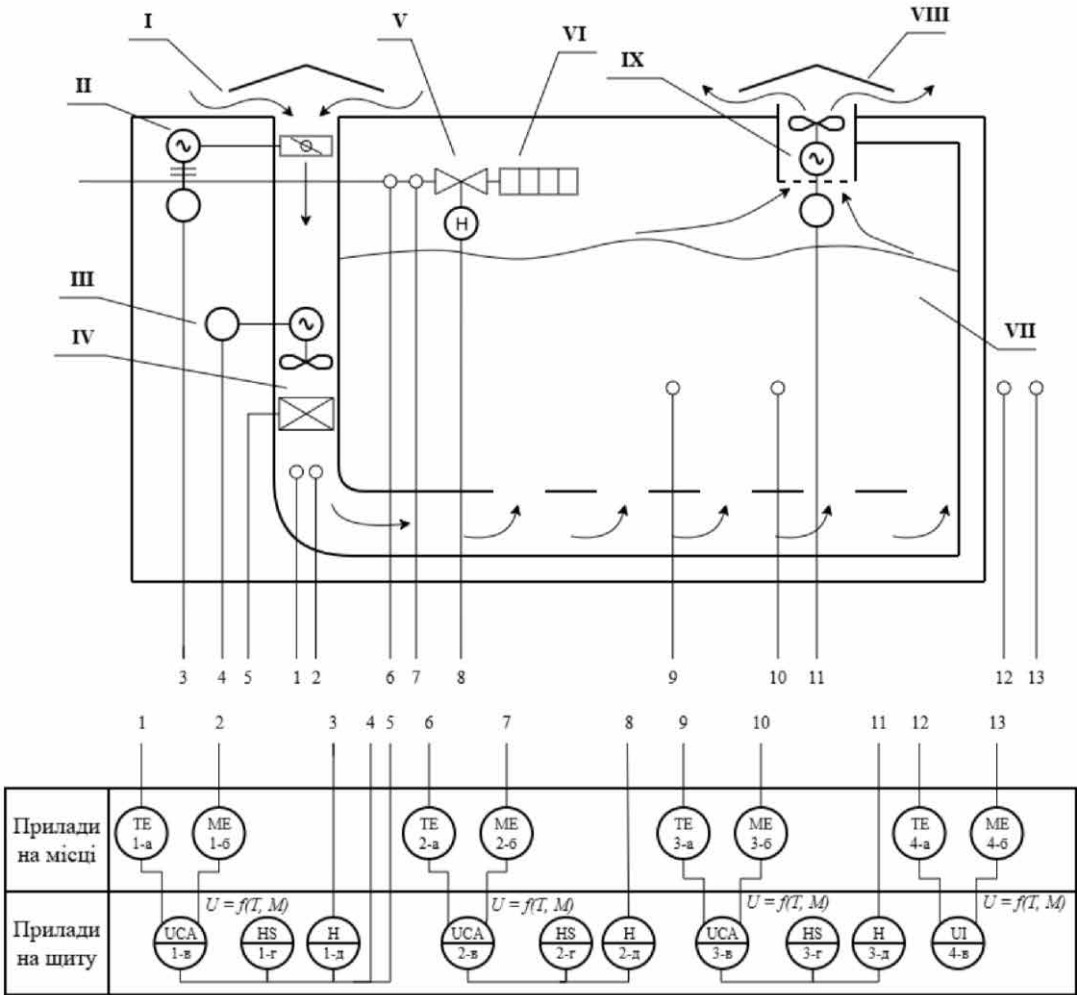
24. Ультразвуковий зволожувач повітря celsius HD-30 купити. ціна - 100 812 ₴ | zenet дніпро. *Медтехніка ZENET-ДНІПРО – медичне та масажне обладнання | Купити у Дніпрі та по Україні*. URL: https://zenetdnepr.com.ua/ua/p1260864296-ultrazvukovoj-uvlazhnitel-vozduha.html?srsId=AfmBOooQD5flkwf-WKoe_2qokxlDVhyDiyX4KMCKRJUU_R6Vz9657_s.

25. Google Colab. *Google Colab*. URL: <https://colab.research.google.com/>.

26. Digi-Cat: Vijeo Citect: SCADA- Supervisory Control And Data Acquisition | Schneider Electric. *Schneider Electric Global | Your Energy Technology Partner*. URL: <https://www.se.com/za/en/download/document/Catalog36400-EN/>.

ДОДАТОК

Додаток А



					02.06-МКР.2440"С".2025.10.22.06.A2		
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	Функціональна схема автоматизації		
Розроб.	Лашко І.О.			05.06.2026			
Перев.	Руденський А.А.			05.06.2026			
Т.контр.							
Н.контр.							
Затв.	Опришко О.О.			05.06.2026			
					Лит.	Маса	Масштаб
					Аркш	Аркшів	1
Розробка системи керування мікрокліматом овочесховища з алгоритмами упередженого прогнозування					НУБІП України каф. автоматизації та робототехнічних систем ім. акад. П. Мартиненка		