

**НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ БІОРЕСУРСІВ  
І ПРИРОДОКОРИСТУВАННЯ УКРАЇНИ**

**ІНСТИТУТ ЕНЕРГЕТИКИ, АВТОМАТИКИ І ЕНЕРГОЗБЕРЕЖЕННЯ**

**ДОПУСКАЄТЬСЯ ДО ЗАХИСТУ**

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

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

" \_\_\_\_ " \_\_\_\_\_ 2025 р.

**КВАЛІФІКАЦІЙНА БАКАЛАВРСЬКА РОБОТА**

**на тему "РОЗРОБКА КОМП'ЮТЕРНО-ІНТЕГРОВАНОЇ СИСТЕМИ  
АВТОМАТИЧНОГО КЕРУВАННЯ МІКРОКЛІМАТОМ В ТЕПЛИЦІ"**

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

**Гарант освітньої програми**

Д.Т.Н., проф. \_\_\_\_\_  
(науковий ступінь та вчене звання) (підпис)

Заєць Н.А.  
(П.І.Б.)

**Керівник кваліфікаційної бакалаврської роботи**

Д.Т.Н., професор \_\_\_\_\_  
(науковий ступінь та вчене звання) (підпис)

Лисенко В.П.  
(П.І.Б.)

**Виконала**

\_\_\_\_\_ (підпис)

Гераймович Б.В.  
(П.І.Б.)

**КИЇВ – 2025**

**НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ БІОРЕСУРСІВ  
І ПРИРОДОКОРИСТУВАННЯ УКРАЇНИ**

**ІНСТИТУТ ЕНЕРГЕТИКИ, АВТОМАТИКИ І ЕНЕРГОЗБЕРЕЖЕННЯ**

**ЗАТВЕРДЖУЮ**

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

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

" \_\_\_\_ " \_\_\_\_\_ 2025 р.

**ЗАВДАННЯ**

**на виконання кваліфікаційної бакалаврської роботи студенту**

**Гераймович Богдана Володимирівна**

(прізвище, ім'я, по батькові)

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

1. Тема кваліфікаційної бакалаврської роботи: "Розробка комп'ютерно – інтегрованої системи автоматичного керування мікрокліматом в теплиці"

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

2. Термін подання завершеної роботи на кафедру "27" травня 2025 р.

3. Вихідні дані до кваліфікаційної бакалаврської роботи:

3.1. Завдання кафедри на виконання кваліфікаційної бакалаврської роботи.

3.2. Нормативні документи по проектуванню об'єктів автоматизації.

3.3. Наукова література з тематики кваліфікаційної бакалаврської роботи.

4. Перелік питань, які необхідно розробити:

4.1. Технологічна характеристика об'єкта керування.

4.2. Розробка комп'ютерно – інтегрованої системи автоматичного керування мікрокліматом в теплиці.

4.3. Схеми системи автоматизації.

4.4. Техніко-економічне обґрунтування.

5. Перелік графічних документів:

5.1 Функціональна схема САК температурою повітря в блочній теплиці

5.2 Схема потоків тепла в теплиці

5.3 Схема електрична принципова

5.4 Схема електрична з'єднань (адресний спосіб виконання)

5.5 Схема електрична підключень

5.6 Схема загального вигляду щита керування

Дата видачі завдання "21" листопада 2024 року

**Керівник  
кваліфікаційної  
бакалаврської роботи**

\_\_\_\_\_

(підпис)

Лисенко В.П.  
(П.І.Б.)

**Завдання прийняв до  
виконання**

\_\_\_\_\_

(підпис)

Гераймович Б.В.  
(П.І.Б.)

## АНОТАЦІЯ

У межах даного дипломного проєкту виконано узагальнений огляд виробничих процесів, що реалізуються в умовах блочної теплиці, а також проаналізовано наявні автоматизовані системи та рівень автоматизації об'єкта.

Запропоновано систему автоматичного регулювання температурного режиму повітря в теплиці, спроектовану на основі принципів підвищення ефективності виробництва з акцентом на економічну доцільність.

Описано основні етапи технологічного процесу вирощування огірків, здійснено обґрунтований вибір обладнання та відповідних засобів автоматизації.

Доцільність запропонованих технічних рішень підтверджено економічними розрахунками, які свідчать про раціональність впровадження даної системи в умовах реального виробництва.

## ЗМІСТ

ВСТУП .....	10
РОЗДІЛ 1.ТЕХНОЛОГІЧНА ХАРАКТЕРИСТИКА ОБ'ЄКТА КЕРУВАННЯ.	12
1.1 Інформаційний аналіз об'єкта керування.....	12
1.2 Розробка функціональної схеми автоматизації.....	18
РОЗДІЛ 2. ПОБУДОВА ТА ДОСЛІДЖЕННЯ МАТЕМАТИЧНОЇ МОДЕЛІ ОБ'ЄКТА КЕРУВАННЯ .....	21
2.1 Розробка математичної моделі.....	21
2.2 Визначення передатної функції об'єкта керування .....	26
РОЗДІЛ 3. ВИБІР АЛГОРИТМУ КЕРУВАННЯ ОБ'ЄКТОМ.....	29
РОЗДІЛ 4. РЕАЛІЗАЦІЯ АЛГОРИТМУ КЕРУВАННЯ ОБ'ЄКТОМ.....	35
4.1 Вибір технічних засобів.....	35
4.1.1 Вибір сприймаючого елемента.....	35
4.1.2 Вибір виконавчого механізму та створення його математичної моделі ...	40
4.2 Розробка схеми електричної принципової.....	42
4.3 Розробка схеми електричних з'єднань .....	44
4.4 Розробка схеми електричних підключень.....	46
4.5 Вибір щита керування .....	48
4.6 Вибір пускозахисної апаратури.....	50
РОЗДІЛ 5. АНАЛІЗ ЯКОСТІ ФУНКЦІОНУВАННЯ АВТОМАТИЧНОЇ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ.....	66
5.1 Оцінка якості автоматичної системи керування.....	66
5.2 Розрахунок надійності системи автоматичного керування.....	71
РОЗДІЛ 6. ТЕХНІКО-ЕКОНОМІЧНЕ ОБГРУНТУВАННЯ.....	75
СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ.....	79
ВИСНОВОК.....	80

## ВСТУП

Кліматичні особливості України спричиняють сезонний характер виробництва овочевої продукції на відкритому ґрунті, що унеможлиблює її рівномірне надходження протягом усього року. Основна частка споживання (понад 90%) припадає на період з липня по вересень, тоді як у першій половині року цей показник становить менш як 6%. У несезонний час продукція потрапляє до споживача нерегулярно.

У зв'язку з цим особливої актуальності набуває розвиток овочівництва у закритому ґрунті, зокрема у тепличних спорудах, що дає змогу стабільно забезпечувати населення овочевою продукцією у зимово-весняний період. Одним з ключових завдань тепличних господарств є забезпечення ринку овочами саме в міжсезоння. У розвинених країнах тепличне виробництво має стратегічне значення, оскільки дозволяє досягати врожайності на рівні 50 кг/м<sup>2</sup> незалежно від кліматичних умов, у той час як у відкритому ґрунті цей показник набагато нижчий — близько 591 ц/га. У середньому, теплиця забезпечує 35–40 кг овочів із 1 м<sup>2</sup>, а застосування систем автоматичного регулювання мікроклімату та агротехнічних стимуляторів дозволяє досягти врожайності до 50 кг огірків на м<sup>2</sup>. Це суттєво підвищує прибутковість і дозволяє швидко повернути інвестиції в автоматизацію.

Температурний режим у тепличному середовищі є одним із ключових факторів, що впливають на результативність вирощування овочів. Однак сучасні системи кліматичного контролю мають низку обмежень: вони не враховують температуру поверхні рослин, вплив сонячної радіації, зовнішні метеоумови, особливості конструкцій огорожень та інші стохастичні чинники.

Інтеграція сучасних автоматизованих технологій у тепличне господарство дає змогу суттєво підвищити не лише якість, а й обсяг виробництва. Як наслідок — зниження собівартості продукції та підвищення її конкурентоспроможності, що відкриває нові економічні перспективи для тепличних виробників.

Мета дослідження:

Підвищення енергоефективності технологічного процесу вирощування огірків у теплицях шляхом впровадження системи автоматизованого керування температурою повітря.

Об'єкт дослідження:

Система керування мікрокліматом у тепличному господарстві, зокрема – температурними параметрами середовища.

Предмет дослідження:

Закономірності функціонування систем автоматичного регулювання температурного режиму та їхній вплив на загальну енергоефективність технологічного процесу.

Завдання дослідження:

Проаналізувати сучасні підходи до автоматизації керування мікрокліматом у тепличному овочівництві.

Визначити вплив різних фізичних та технологічних факторів на температурний режим у теплиці з метою оптимального керування.

Розробити структурну та принципову схеми автоматизованої системи керування температурою.

Провести оцінку ефективності запропонованої системи з точки зору енергоспоживання та економічної доцільності.

## **РОЗДІЛ 1. ТЕХНОЛОГІЧНА ХАРАКТЕРИСТИКА ОБ'ЄКТА КЕРУВАННЯ**

### **1.1 Інформаційний аналіз об'єкта керування**

Теплиці є найбільш технологічно розвиненим типом споруд закритого ґрунту для вирощування рослин. Їх головна відмінність полягає в здатності не лише створювати сприятливі умови для розвитку культур, але й забезпечувати комфортні умови праці для персоналу та належну експлуатацію обладнання. Завдяки цьому вдається досягти високої продуктивності праці, поліпшити організацію виробничого процесу та усунути сезонність сільськогосподарських робіт.

На відміну від тимчасових укриттів або парників, у повноцінних теплицях можна виконувати всі необхідні агротехнічні операції без демонтажу огорожувальних конструкцій. Крім того, в таких умовах зручно застосовувати різноманітні механізовані засоби для догляду за культурами.

Теплиці поділяють за експлуатаційними та будівельними характеристиками, зокрема: за функціональним призначенням, режимом роботи (сезонні або цілорічні), типом вирощування, видом світлопрозорих огорожень, формою конструкції та типом системи обігріву.

Вирощування сільськогосподарських культур у захищеному ґрунті має низку суттєвих переваг:

Можливість забезпечення стабільного температурного режиму, адаптованого під конкретні біологічні вимоги культури.

Поєднання різних методів поливу та ефективна система дренажу дозволяють підтримувати оптимальний рівень вологості субстрату.

Створення необхідних фізико-хімічних характеристик ґрунту завдяки використанню відповідних сумішей (садова земля, торф, пісок, штучні матеріали) та добрив (органічних і мінеральних).

Підтримка необхідної вологості повітря шляхом застосування природної або примусової вентиляції.

Забезпечення активного росту рослин у зимовий період за рахунок додаткового освітлення та внесення підживлень.

Попри переваги, вирощування у теплицях супроводжується певними труднощами. Серед основних – висока вартість спорудження та експлуатації тепличних об'єктів, особливо в умовах цілорічного використання. Значну частку витрат становлять енергоносії, добрива та засоби захисту рослин.

При виборі ділянки під будівництво теплиці важливо враховувати низку факторів: достатній рівень природного освітлення, захищеність від переважаючих вітрів, а також гідрологічні характеристики території. Рівень ґрунтових вод повинен бути стабільним і розташовуватись на глибині не меншій за 1,3–1,5 м. У разі близького залягання ґрунтових вод необхідно передбачити систему дренажу або водовідвідні канали. Також, у місцевостях із підвищеною вологістю рекомендується влаштовувати водостоки та резервуари для накопичення дощової води, яка може бути використана у технічних цілях.

Вид теплиці обирають за певними ознаками (табл. 1.1).

За технічними ознаками	<ul style="list-style-type: none"> <li>- овочеві</li> <li>- комбіновані</li> <li>- квіткові (оранжереї)</li> </ul>
За сезонністю	<ul style="list-style-type: none"> <li>- зимові</li> <li>- весняні</li> </ul>
За технологією вирощування:	<ul style="list-style-type: none"> <li>- ґрунтові</li> <li>- стелажні</li> <li>- гідропонні</li> </ul>
За будівельними ознаками:	<ul style="list-style-type: none"> <li>- полімерні</li> <li>- дерев'яні</li> <li>- металеві каркаси</li> </ul>
По виду огорожі:	<ul style="list-style-type: none"> <li>- засклені</li> <li>- плівкові</li> </ul>
За конструктивними особливостями:	<ul style="list-style-type: none"> <li>- ангарні і блокові</li> <li>- прямі та арочні</li> </ul>

Таблиця 1.1 Класифікація теплиць

У межах даного дипломного проєкту об'єктом дослідження є блочна скляна теплиця зимово-весняного циклу площею 1 гектар.

Теплиця блочного типу характеризується двосхилим дахом та спільним внутрішнім простором, у якому бічні суміжні стіни між окремими секціями замінено опорними стійками. Така конструктивна схема забезпечує економічність у будівництві, оскільки потребує менше матеріалів на огороження і дозволяє використовувати спільні інженерні системи.

Каркасні елементи теплиці виконані з металу, що гарантує високу механічну міцність та довговічність споруди. Однією з переваг блочної структури є централізована організація поливу, обігріву та обслуговування: це зменшує витрати часу на переміщення персоналу в межах тепличного комплексу, а також сприяє підвищенню продуктивності праці.

Велика площа теплиці відкриває широкі можливості для механізації основних агротехнічних операцій — таких як обробіток ґрунту, догляд за рослинами, збір урожаю та внутрішньогосподарські перевезення. Завдяки достатній висоті конструкції в ній можливо використовувати сільськогосподарську техніку, що ще більше оптимізує виробничі процеси. Загальну конструкцію теплиці блочного типу зображено на рисунку 1.1.



Рис. 1.1 Загальний вигляд блочної теплиці

Скло як матеріал для покриття теплиць має ряд істотних переваг, що забезпечують його актуальність навіть за наявності сучасніших альтернатив. Насамперед варто відзначити його доступність — у багатьох випадках скло можна дістати абсолютно безкоштовно. Воно характеризується високою прозорістю та можливістю регулювання спектру світла за допомогою тонування. Догляд за склом є простим, а його миття не вимагає спеціальних засобів. У разі пошкодження елементів скляного покриття, їх легко замінити без демонтажу великої площі. Крім того, скло є довговічним матеріалом, який не схильний до подряпин і значно перевершує полікарбонат за строком експлуатації. За потреби, окремі елементи конструкції, наприклад покрівлю, можна замінити іншими матеріалами без порушення цілісності теплиці.

Блочна теплиця зимово-весняного циклу має ряд переваг, які забезпечують її економічну ефективність та функціональність. До таких переваг належить велика корисна площа, що дозволяє більш раціонально використовувати простір, а також рівномірне освітлення культур з усіх боків. Завдяки конструктивним особливостям, у таких теплицях зручно використовувати засоби малої механізації. Можливість розширення теплиці за рахунок додавання додаткових прольотів дає змогу адаптувати її до змін у виробничих потребах. Висока врожайність і стабільний попит на продукцію сприяють швидкій окупності теплиці.

Попри те, що тепличні огірки іноді вважаються менш смачними, ніж вирощені у відкритому ґрунті, сучасні сорти дозволяють отримати якісний урожай навіть у закритому середовищі. Вибрані сорти є невибагливими, не вимагають значних зусиль у догляді. Технологія вирощування огірків у теплицях має свої особливості, проте за дотримання необхідних умов результат цілком задовільний. Ця культура потребує простору, тому навіть у тепличних умовах важливо дотримуватися відстані між рослинами: у рядку — 40–60 см,

між рядами — 1,2–1,4 м. Насіння висівають у березні у горщики діаметром не менше 8 см, з родючим ґрунтом, по одному зерну в кожен.

Одним із головних факторів вирощування огірків у теплиці є температурний режим. Оптимальною температурою для росту цієї культури є приблизно 20 °С, хоча прийнятний діапазон становить 18–25 °С. У теплицях зимово-весняного типу переважно використовується трубна система опалення. Труби прокладають уздовж бічних стін теплиці (по 5–7 труб у висоту), на ґрунті, а також під покрівельним склінням. Приґрунтові труби укладають з інтервалом 0,8 м, з'єднуючи попарно, що формує зручні проходи для переміщення врожаю за допомогою візків (рис. 1.3). Для покрівельного та приґрунтового обігріву застосовують труби діаметром 45, 51 та 57 мм, для бокового обігріву — 51 і 76 мм.



Рис. 1.3 Труби приґрунтового обігріву в блокової теплиці

Для забезпечення циркуляції теплоносія у системі опалення теплиці використовуються циркуляційні насоси, які, як правило, встановлюють у зворотному трубопроводі. Така конфігурація дає змогу досягти більш стабільних гідравлічних умов роботи насосного обладнання та знижує ризик гідроударів або перевантаження.

Трубчаста система обігріву вирізняється конструктивною простотою, надійністю та здатністю формувати рівномірне температурне поле по всьому об'єму теплиці. Її ключова перевага полягає в тому, що теплова енергія

передається безпосередньо до самих рослин, а не лише до повітряного середовища. При температурі поверхні труб, що становить 90–100 °С, до 50% тепла передається за рахунок інфрачервоного випромінювання, що є особливо актуальним у зимовий період при дефіциті природного сонячного світла.

Одним із найважливіших факторів для підтримання сприятливого мікроклімату в тепличному середовищі є вентиляція. Без належного повітрообміну агротехнічні параметри вирощування овочевих культур порушуються, що може негативно вплинути на ріст, плодоношення, а в деяких випадках — призвести до загибелі рослин. Саме тому сучасні тепличні господарства дедалі частіше впроваджують автоматизовані системи вентиляції, що функціонують без участі людини.

Для ефективної роботи такої системи важливо передбачити механізми, що забезпечують автоматичне відкривання та закривання фрамуг. Управління виконується за допомогою електроприводів, оснащених малопотужними двигунами, які приводяться в дію за сигналом системи керування. Щоб уникнути пошкодження механізмів у крайніх положеннях, у конструкції використовуються кінцеві вимикачі у вигляді кнопкових елементів. Вони розмикають електричне коло, зупиняючи двигун при досягненні граничної точки відкривання або закривання.

Функціонування вентиляційної системи адаптується до зовнішніх кліматичних умов: ступінь відкривання фрамуг змінюється залежно від температури зовнішнього повітря. Система обмежує кут розкриття у межах від 5 до 40 % на кожен градус температури, що дозволяє ефективно регулювати мікроклімат всередині теплиці.

## 1.2 Розробка функціональної схеми автоматизації

Функціональна схема автоматизації є ключовим елементом проєктної документації, що визначає як рівень автоматизації, так і структуру управління технологічним процесом конкретного об'єкта. На такій схемі за допомогою умовних графічних позначень відображають технологічне обладнання, трубопроводи та комунікації, органи керування, контрольно-вимірювальні прилади та інші засоби автоматизації. При цьому обов'язково зазначаються функціональні зв'язки між усіма елементами, а також додається таблиця позначень і супровідні пояснення.

Схема автоматизації традиційно поділяється на дві умовні частини. У верхній частині креслення розташовується технологічна схема, яка відображає основні вузли виробничого процесу, а в нижній — умовні зображення автоматизованих приладів та елементів керування: пультів, щитів, контрольних точок. Графічні позначення засобів автоматизації, їхні розміри та маркування мають відповідати вимогам стандарту ГОСТ 21.404-85 СПДС, що регламентує правила побудови схем автоматизації технологічних процесів.

Прилади та пристрої автоматизації на функціональних схемах подаються в розгорнутому вигляді — кожен елемент зображується окремим символом. У верхній частині умовного позначення (кола або овалу) вказується фізична величина, яку вимірює пристрій, та його функціональне призначення. Ці позначення розміщуються зліва направо. У нижній частині символу наводиться позиційне маркування вимірювального комплексу або його окремих елементів.

До функціональних частин схеми належать:

Елемент схеми — складова частина, яка виконує окрему функцію, і не підлягає поділу на автономні одиниці з окремими умовними позначеннями.

Пристрій — конструктивна одиниця, що складається з кількох елементів, які утворюють єдину систему.

Функціональна група — набір елементів, які виконують спільну функцію, але конструктивно не об'єднані в один пристрій.

Функціональне коло — логічно пов'язана сукупність елементів, пристроїв або функціональних частин, які реалізують окремий канал управління чи контролю.

Для функціональних електричних схем відсутні окремі стандартизовані графічні позначення, проте оформлення виконується згідно з загальними вимогами до технічної документації відповідно до ГОСТ 2.702-2011, який входить до Єдиної системи конструкторської документації.

Функціональна схема наочно демонструє логіку процесів, які реалізуються в межах окремих функціональних кіл або всієї системи загалом. На відміну від структурної, така схема більш глибоко деталізує функціональне призначення кожного елементу чи блоку. Вона включає в себе всі функціональні компоненти системи та основні зв'язки між ними (рис. 1.4). У випадках, коли декілька елементів виконують спільну функцію, їх об'єднують у функціональні групи, які позначаються на схемі штрих-пунктирними лініями з обов'язковим зазначенням найменування або умовного маркування кожної групи.

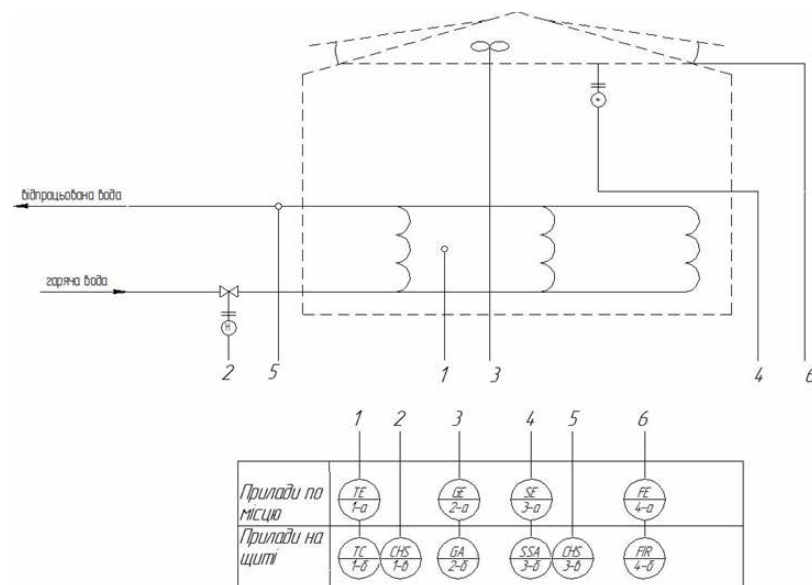


Рисунок 1.4 Функціональна схема САК температурою повітря в блочній теплиці

Пояснення до елементів функціональної схеми:

TE — температурний датчик, який фіксує поточне значення температури повітря в теплиці;

TC — блок, що здійснює регулювання температури в автоматичному режимі;

CHS — вузол перемикання керування у ручний режим;

GE — елемент, який відповідає за фіксацію ступеня відкриття фрамуг;

GA — пристрій для сигналізації про поточне положення фрамуг;

SE — модуль, що контролює швидкість відкривання або закривання фрамуг;

SSA — система, яка активує сигналізацію у момент зміни положення фрамуг (відкриття/закривання);

FE — модуль оцінки втрат повітря при відкритих фрамугах;

FIR — блок для реєстрації об'єму повітря, що виходить із теплиці через відкриті фрамуги.

Принцип дії системи автоматизації базується на зворотному зв'язку між датчиком температури та виконавчими елементами. Коли температура повітря в теплиці знижується до порогового значення (наприклад, 20 °C), температурний датчик типу TCM-8034M фіксує це значення та передає сигнал на контролер. Після цього виконується команда на запуск електроприводу МЕО4/100, який активує подачу гарячої води у систему обігріву.

При досягненні температурного максимуму (приблизно 23 °C) температурний датчик знову спрацьовує та надсилає сигнал на контролер. В результаті виконавчий механізм подає команду на відкриття фрамуг для вентиляції теплиці та підтримання комфортного мікроклімату.

## РОЗДІЛ 2.

# ПОБУДОВА ТА ДОСЛІДЖЕННЯ МАТЕМАТИЧНОЇ МОДЕЛІ ОБ'ЄКТА КЕРУВАННЯ

### 2.1 Розробка математичної моделі

Основною метою даного розділу є побудова математичної моделі об'єкта керування з урахуванням впливу регулюючого параметра, а також розробка імітаційної моделі на основі рівняння, що описує динамічну зміну цього параметра. Подальше дослідження моделі дозволить визначити постійну часу об'єкта, розрахувати величину транспортного запізнення та встановити значення передаточного коефіцієнта.

Умови вирощування сільськогосподарських культур у захищеному ґрунті передбачають підтримання стабільного температурного режиму, що досягається шляхом використання систем повітряного підігріву. Як джерела тепла можуть застосовуватись водяні, парові або пароводяні системи. У цьому дослідженні для моделювання температурних процесів у теплиці приймається спрощене припущення, що об'єкт має зосереджені параметри.

Температура повітря всередині теплиці, що позначається як  $t_{pt\_ptr}$ , вважається однорідною по всьому об'єму. Середня температура теплоносія в трубчастій системі опалення, позначена як  $t_{vt\_vtv}$ , приймається як середньоарифметичне між температурою води на вході в систему  $t_{gt\_gtg}$  та температурою на виході  $t_{yt\_yty}$ .

Для побудови статичної математичної моделі по температурному каналу розглянемо технологічний об'єкт як послідовне з'єднання двох енергетично акумулюючих ланок. Перша ланка — це система теплоносія (гаряча вода), а друга — повітряне середовище теплиці, що нагрівається (див. рис. 2.1). Такий підхід дозволяє адекватно описати взаємозв'язки між елементами системи опалення та навколишнім середовищем, що є критично важливим для подальшого аналізу динаміки процесу керування.

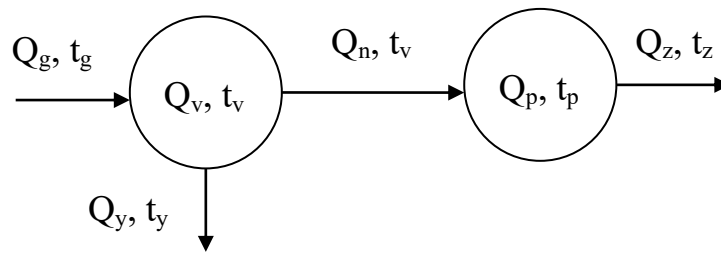


Рисунок 2.1 Схема потоків тепла в теплиці

У стаціонарному (статичному) режимі роботи системи кількість теплоти, накопичена у теплоносії  $Q_v$ , а також у повітряному середовищі теплиці  $Q_p$ , залишається постійною. Це означає, що для опису теплових процесів у системі можна скласти два рівняння теплового балансу, які відповідно характеризують тепловий стан водяного та повітряного середовища:

для води:

$$Q_g - Q_y - Q_n = 0, \quad (2.1)$$

і для повітря теплиці:

$$Q_n - Q_z = 0, \quad (2.2)$$

де  $Q_g$  - тепло введене з водою,

$Q_y$  - тепло виведене з водою,

$Q_n$  - тепло, що перейшло до повітря,

$Q_z$  - тепло втрачене в навколишній простір.

Кількість теплоти, що надходить у систему опалення теплиці протягом однієї секунди, а також відводиться з неї, залежить від таких параметрів: теплоємності води  $C_v$ , продуктивності насосного агрегату  $G_n$ , густини води  $\rho_v$  та температури теплоносія на вході та виході. При цьому обсяг теплоти,

накопиченої у системі, додатково визначається об'ємом води в системі  $V_v$ .  
Відповідно до цього:

$$Q_g = C_v G_n \rho_v t_g, \quad (2.3)$$

$$Q_y = C_v G_n \rho_v t_y, \quad (2.4)$$

$$Q_v = C_v V_v \rho_v t_v, \quad (2.5)$$

Кількість теплоти, що акумулюється в повітряному об'ємі теплиці, залежить від теплоємності повітря  $C_p$ , густини повітря  $\rho_v$ , відповідної температури повітря  $t_p$  і об'єму теплиці  $V_p$ :

$$Q_p = C_p V_p \rho_p t_p, \quad (2.6)$$

Кількість теплоти, що передається від води через стінку труби до внутрішнього повітря теплиці, а також від повітря через скляне покриття до зовнішнього середовища, розраховується на основі закону теплопровідності Фур'є:

$$Q_n = k_1 F_t (t_v - t_p), \quad (2.7)$$

$$Q_z = k_2 F_c (t_p - t_z), \quad (2.8)$$

де  $k_1, k_2$  – Коефіцієнти теплопередачі, які відповідають за передачу тепла через стінку трубопроводу системи обігріву та через скляну поверхню теплиці

$F_t, F_c$  – поверхня труби системи опалення і скляна поверхня теплиці.

Коефіцієнти теплопередачі рахуються по відомій формулі:

$$k_1 = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_{vt}} + \frac{\delta_t}{\lambda_t} + \frac{1}{\alpha_{tp}}}, \quad (2.9)$$

$$k_2 = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_{pc}} + \frac{\delta_c}{\lambda_c} + \frac{1}{\alpha_{cz}}}, \quad (2.10)$$

де  $\alpha_{vt}$ ,  $\alpha_{tp}$ ,  $\alpha_{pc}$ ,  $\alpha_{cz}$  – чотири основні коефіцієнти: від води до внутрішньої поверхні труби, від труби до повітря теплиці, від повітря до скляної поверхні огороження, а також від скла до зовнішнього середовища

$\lambda_t$ ,  $\lambda_c$  – коефіцієнти теплопровідності відповідно сталі труби і скла стінки;

$\delta_t$ ,  $\delta_c$  – товщина стінки труби і скла.

Після розгляду статичної моделі об'єкта керування переходимо до її динамічного опису. З урахуванням рівнянь, що відповідають стаціонарному режиму, а також наведених вище залежностей, формуємо систему диференціальних рівнянь, яка описує зміну кількості теплової енергії з часом у водяному та повітряному середовищах теплиці. При цьому припускаємо, що такі параметри, як об'єми середовищ, густина, а також теплоємність води і повітря, залишаються постійними. У результаті диференціювання виконується за температурою теплоносія  $t_v$  та температурою повітря в теплиці  $t_p$ :

$$C_v V_v \rho_v \frac{dt_v}{d\tau} = C_v G_n \rho_v t_g - C_v G_n \rho_v t_y - k_1 F_t (t_v - t_p),$$

$$C_p V_p \rho_p \frac{dt_p}{d\tau} = k_1 F_t (t_v - t_p) - k_2 F_c (t_p - t_z). \quad (2.11)$$

Вважаючи, що  $t_v = (t_g + t_y)/2$ , на основі отриманого рівняння визначаємо значення температури води, що охолола після проходження через теплицю, та підставляємо це значення у рівняння (2.11). Після проведення необхідних алгебраїчних перетворень і спрощень рівняння (2.11) набуває вигляду, що відповідає формі задачі Коші.

$$\frac{dt_v}{d\tau} = \frac{2G_n}{V_v}(t_g - t_v) - \frac{k_1 F_t(t_v - t_p)}{C_v V_v \rho_v},$$

$$\frac{dt_p}{d\tau} = \frac{k_1 F_t(t_v - t_p) - k_2 F_c(t_p - t_z)}{C_p V_p \rho_p}. \quad (2.12)$$

## 2.2 Визначення передатної функції об'єкта керування

Характеристики автоматизованої системи, що забезпечують підтримання параметрів технологічного процесу або функціонування обладнання в заданих межах, визначають якість її роботи. Вимоги до значень цих параметрів формуються залежно від специфіки процесу або умов експлуатації агрегату. У кожному конкретному випадку ці вимоги можуть відрізнятися, однак існує ряд універсальних показників, які дозволяють дати оцінку якості роботи системи практично для будь-якого об'єкта.

Властивості об'єкта керування проявляються через його динамічні характеристики, які, у свою чергу, описуються за допомогою передаточних функцій.

Структурно-функціональна схема системи автоматичного регулювання температури повітря в блочній теплиці, що розглядається як об'єкт регулювання, подана на рисунку 2.2.

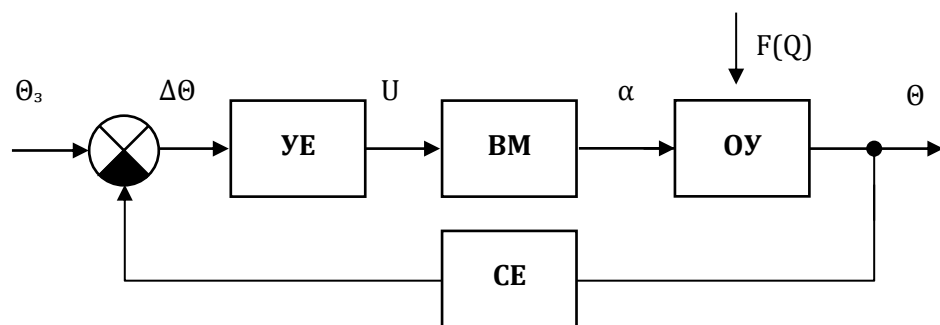


Рис. 2.2 Структурно-функціональна схема САК температурою повітря в блочній теплиці.

Структурно-функціональна схема системи автоматичного керування включає такі основні функціональні складові:

СЕ — чутливий елемент, що виконує роль первинного вимірювального перетворювача;

УЕ — регулюючий елемент, який забезпечує формування управляючої дії;

ВМ — виконавчий механізм, що реалізує фізичне втручання в об'єкт;

ОУ — об'єкт керування, у даному випадку — повітряне середовище теплиці.

Для оцінювання динамічних характеристик теплиці як об'єкта регулювання температури повітря було використано її розгінну характеристику (рис. 2.3), яка відображає зміну температури повітря в часі у відповідь на ступінчасту зміну керуючого сигналу. На рисунку 2.4 представлено нормовану форму цієї характеристики.

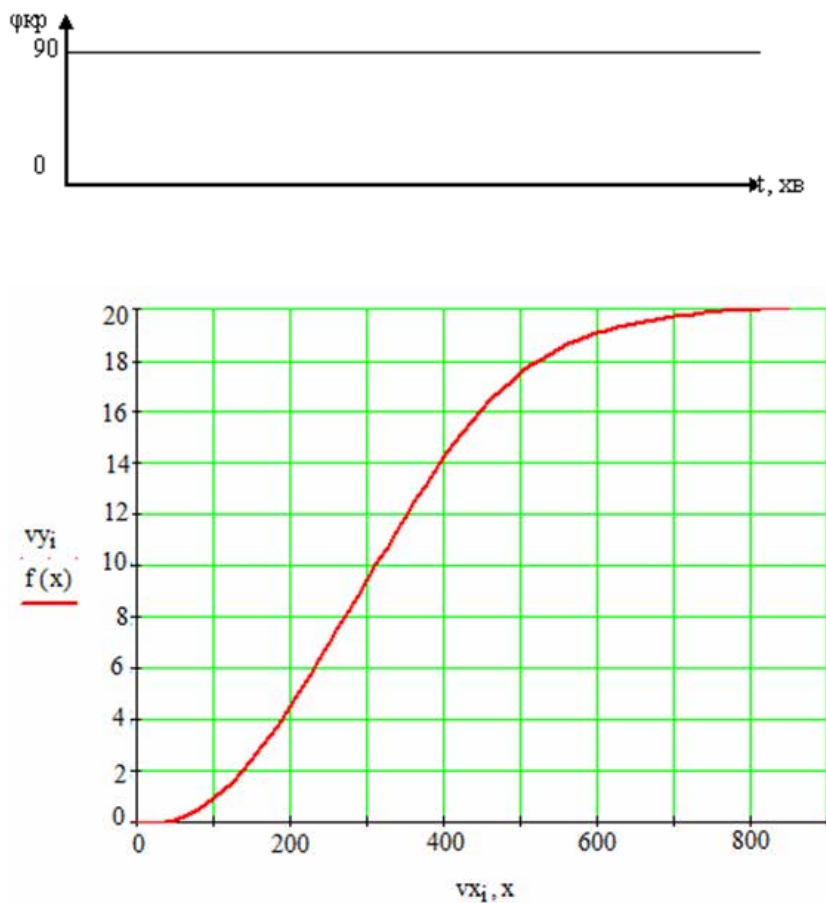


Рис. 2.3 Розгінна характеристика об'єкту

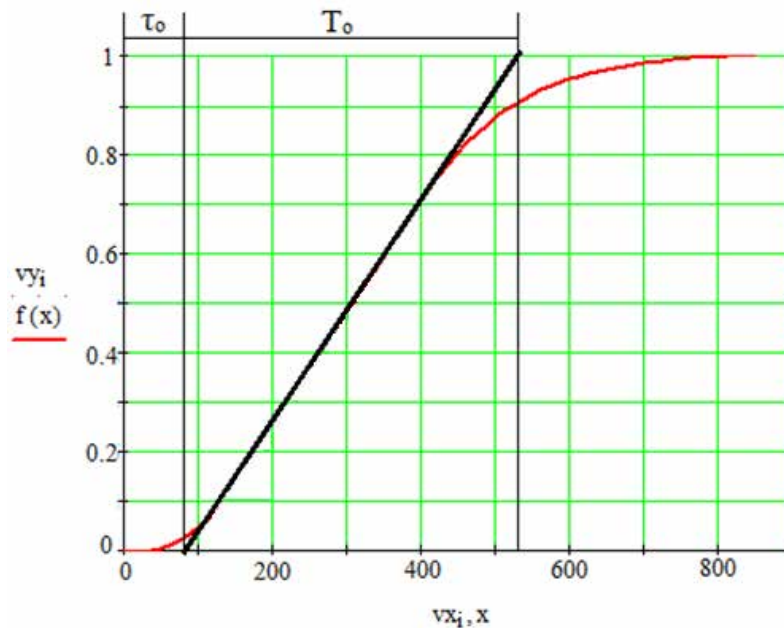


Рис. 2.4 Нормована характеристика перехідного процесу

За допомогою розгінної характеристики знайдемо час чистого запізнення  $\tau_0=90\text{с}$ , постійну часу  $T_0= 450\text{с}$ .

Коефіцієнт підсилення об'єкта  $K_0$  визначаємо по формулі :

$$K_0 = \frac{\Delta T}{\Delta \varphi_{кр}} \quad (2.13)$$

$$\text{де } \Delta T = T_{\max} - T_{\min} = 25^\circ\text{C} - 18^\circ\text{C} = 7^\circ\text{C} \quad (2.14)$$

$$\Delta \varphi_{кр} = \Delta \varphi_{кр1} - \Delta \varphi_{кр2} = 40\% - 5\% = 35\% \quad (2.15)$$

Тоді:  $K_0 = 7/35 = 0.2$ .

У даному випадку теплицю як об'єкт регулювання температури повітря доцільно представити у вигляді інерційної ланки з транспортним запізненням.

Передаточна функція такої моделі матиме наступну форму:

$$W_0(p) = \frac{K_0 \cdot e^{-p \cdot \tau_0}}{T_0 \cdot p + 1} = \frac{0.2 \cdot e^{-90 \cdot p}}{450 \cdot p + 1}, \quad (2.16)$$

де  $p$  – оператор Лапласа.

### РОЗДІЛ 3. ВИБІР АЛГОРИТМУ КЕРУВАННЯ ОБ'ЄКТОМ

Динамічні характеристики об'єкта керування дозволяють ще на етапі проєктування системи обґрунтовано обрати структуру алгоритму керування. З цією метою необхідно виконати аналіз співвідношення між постійною часу об'єкта та величиною його запізнення. Якщо  $0,2 \leq \frac{\tau}{T} \leq 1$ , то рекомендують лінійний алгоритм керування; коли  $\frac{\tau}{T} > 1$  - імпульсний; при  $\frac{\tau}{T} < 0,2$  - позиційний алгоритм керування.

Виходячи з передатної функції ОК,  $\frac{\tau}{T} = \frac{90}{450} = 0,2$  - обираємо лінійний алгоритм керування.

Підхід до вибору оптимального алгоритму керування базується на визначенні динамічного коефіцієнта регулювання. Оскільки теплиця належить до статичних об'єктів, розрахунок цього коефіцієнта проводиться з урахуванням особливостей, характерних саме для об'єктів зі статичною поведінкою.

$$R_D = \frac{y_1}{K_0 \cdot y_{max}}, \quad (3.1)$$

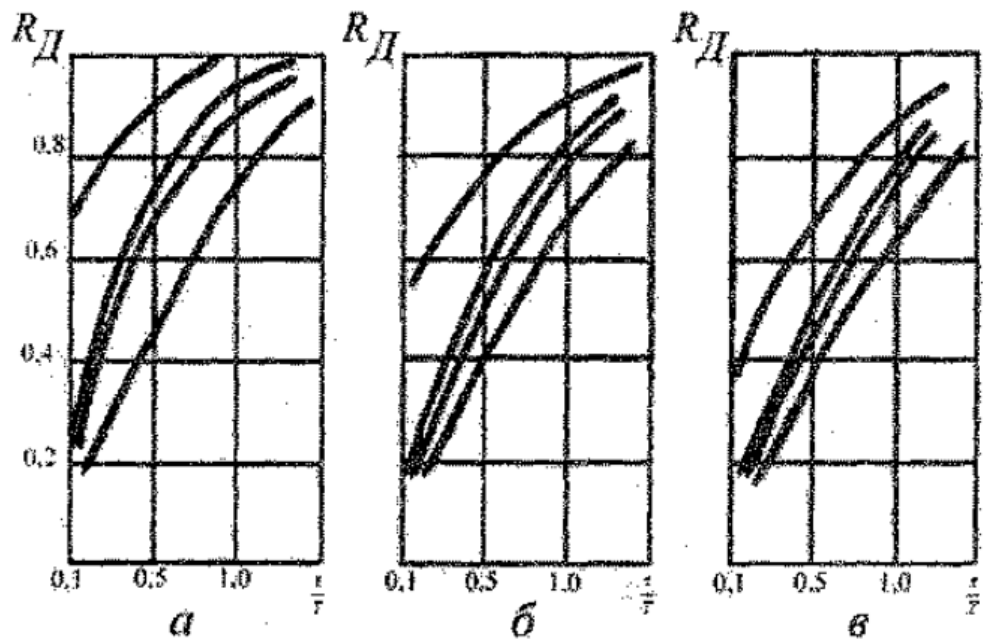
де  $y_1$  - максимальне динамічне відхилення;  $K_0$  - коефіцієнт передачі ОК;  $y_{max}$  - максимально допустиме значення збурення за навантаженням визначається у вигляді відсоткового відношення до повного діапазону переміщення регульовального органа.  $R_D = \frac{7}{0,2 \cdot 40} = 0,875$

На основі графічних залежностей, поданих на рисунку 3.1, виконується визначення типу алгоритму керування шляхом аналізу характеру перехідного процесу.

Типовий варіант перехідної характеристики обирається з урахуванням вимог, які висуваються до конкретного об'єкта автоматизації.

Відповідно до технологічних умов, час встановлення параметра не повинен перевищувати 1000 секунд, а допустиме відхилення температури — не більше ніж  $1\text{ }^{\circ}\text{C}$ . З огляду на це, доцільним є вибір аперіодичного перехідного процесу, оскільки він забезпечує найменший час регулювання при відносно невеликому динамічному відхиленні.

Згідно з рисунком 3.1, для заданих умов раціональним буде використання пропорційного алгоритму керування.



1 – П-алгоритм керування; 2 – І-алгоритм керування; 3 – ПІ-алгоритм;  
4 – ПІД-алгоритм 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.

Рисунок 3.1. Динамічний коефіцієнт регулювання безпосередньо залежить від динамічних характеристик об'єкта керування, зокрема від співвідношення між його сталою часу, запізненням та інерційністю процесу.

Необхідно переконатися, що при обраному алгоритмі забезпечується заданий час регулювання. Для цього, згідно з таблицею 3.1, визначається значення відносного часу регулювання:  $\Psi=4.5$ .

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-диференціальний	Статичний	5,5	7,0	10,0
	Астатичний	9,0	12,0	13,0

Використовуючи формулу (3.2) обчислимо час регулювання:

$$t_{pn} = \Psi \cdot \tau \quad (3.2)$$

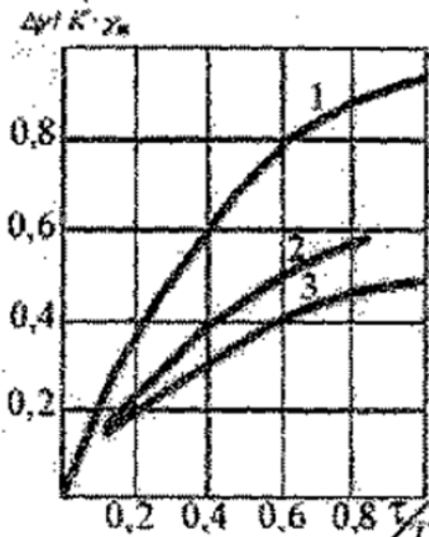
$$t_{pn} = 4.5 \cdot 90 = 405 \text{ (с)}$$

Отримані результати свідчать про те, що значення часу регулювання становить 405 с, що менше допустимого значення 1000 с. Таким чином, за критерієм часу встановлення пропорційний алгоритм є прийнятним. Водночас слід зазначити, що характерним недоліком П-регулятора є наявність сталої похибки у встановленому режимі.

$$\Delta = K_0 \cdot y_{max} \cdot k, \quad (3.3)$$

де  $k$  — коефіцієнт, що використовується для визначення величини статичної похибки при застосуванні пропорційного закону регулювання.

З метою розрахунку статичної похибки, за графічною залежністю, наведеною на рисунку 3.2, визначається відповідне значення коефіцієнта  $k$ .



1 – для типового аперіодичного переходного процесу; 2 – з 20%-вим перерегулюванням; 3 – з мінімальним інтегральним показником якості.

Рисунок 3.2. Графічні співвідношення, що використовуються для оцінювання величини статичної похибки в умовах застосування пропорційного алгоритму регулювання.

Застосувавши формулу (3.3), виконаємо обчислення значення статичної похибки для обраного алгоритму регулювання.

$$\Delta = 0.2 \cdot 40 \cdot 0.6 = 4.8^\circ\text{C}.$$

Оскільки отримане значення статичної похибки перевищує допустимий рівень ( $4,8^\circ\text{C} > 1^\circ\text{C}$ ), застосування П-регулятора не забезпечує необхідної точності керування, а отже, не відповідає встановленим вимогам. Для ПІ-алгоритму згідно з даними, наведеними в таблиці 3.1, визначаємо значення коефіцієнта  $\Psi$ , яке дорівнює 8. Використовуючи формулу (3.2), розраховуємо час регулювання для даного типу керування:

$$t_{PI} = 8 \cdot 90 = 720$$

Результати розрахунків свідчать про те, що  $720 \text{ с} < 1000 \text{ с}$ .

Оскільки ПІ-регулятор забезпечує виконання вимог щодо часу регулювання та не має статичної похибки, саме цей алгоритм доцільно застосовувати у даному випадку.

У ситуаціях, коли необхідно, щоб регулюючий елемент змінював своє положення пропорційно до величини відхилення, а також з відповідною швидкістю, пропорційною цьому ж відхиленню, застосовується пропорційно-інтегральний закон регулювання. Регулятори, що реалізують такий принцип роботи, отримали назву ПІ-регуляторів.

Такі пристрої поєднують у собі властивість швидкого реагування, характерну для пропорційних регуляторів, та високу точність, властиву інтегральному впливу, що дозволяє ефективно компенсувати збурення і підтримувати керовану величину в заданих межах.

Розрахунок параметрів налаштування регулятора.

Обраний тип регулювання та відповідний регулятор повинні забезпечувати реалізацію одного з типових перехідних процесів. Проте, залежно від конкретних значень параметрів налаштування, можуть спостерігатися різні відхилення від заданих значень, що регламентуються технологічними вимогами. Тому виникає необхідність у точному розрахунку параметрів налаштування регулятора, з урахуванням специфіки об'єкта керування та бажаної динаміки процесу.

Але при цьому слід пам'ятати, що параметри об'єкта ( $\tau_o, T_o, K_o$ ) визначають по нормованим кривим розгону графічним методом.

Передаточна функція ПІ-регулятора має вигляд:

$$W_{reg}(p) = K_r \left( 1 + \frac{1}{T_{iz} \cdot p} \right), \quad (3.4)$$

$$K_r = \frac{0.7}{K_o \cdot \tau_o / T_o} = \frac{0.7}{0.2 \cdot 90 / 450} = 17.5, \quad (3.5)$$

де  $K_r$  коефіцієнт передачі регулятора;

$T_{iz}$  - час ізодрому,

$$T_{IZ} = 0.7 \cdot T_O = 0.7 \cdot 450 = 315 \text{ c} \quad (3.6)$$

Отже, передаточна функція ПІ-регулятора має вигляд:

$$W_{REG}(p) = 17.5 \left( 1 + \frac{1}{315 \cdot p} \right)$$

## РОЗДІЛ 4.

### РЕАЛІЗАЦІЯ АЛГОРИТМУ КЕРУВАННЯ ОБ'ЄКТОМ

#### 4.1 Вибір технічних засобів

##### 4.1.1 Вибір сприймаючого елемента

Вибір сприймаючих елементів, які входять до складу регулятора, зазвичай здійснюється у два послідовні етапи:

- на першому етапі, орієнтуючись на тип контролюваного параметра та умови функціонування об'єкта керування, визначають вид вимірювального перетворювача;
- на другому — після остаточного підбору всіх складових регулятора, з урахуванням довідкових матеріалів визначається типорозмір перетворювача.

Рекомендовано обирати датчик таким чином, щоб межі його вимірювання максимально охоплювали реальний діапазон зміни контролюваного параметра. Водночас важливо передбачити достатній запас перевантажувальної здатності та сумісність з електронною частиною системи автоматичного керування.

Особливу увагу необхідно приділити інерційності датчика — його здатності оперативно реагувати на зміни в середовищі. Цей параметр визначається постійною часу ТСЕ, яка, для коректної роботи системи, повинна бути суттєво меншою за постійну часу об'єкта керування ТО.

До основних вимог, які висуваються до первинних вимірювальних елементів, належать:

- лінійність та однозначність у статичній характеристиці (допустимий рівень нелінійності не повинен перевищувати 0,1–3 %);
- висока чутливість до зміни вимірюваного параметра;
- стабільність характеристик у довготривалій експлуатації;
- достатня швидкодія;
- стійкість до впливів агресивного середовища, як контрольованого, так і навколишнього (використання захисного корпусу для чутливого елемента);
- мінімальний зворотний вплив на сам процес вимірювання;
- зручність в установці, налаштуванні та обслуговуванні.

Під час обґрунтування вибору температурного датчика для системи керування температурою повітря в блочній теплиці, першочергово слід враховувати діапазон робочих температур, який повинна підтримувати система згідно з технічним завданням. Крім того, динамічні характеристики датчика мають забезпечувати точність стабілізації — для цього його постійна часу ТСЕ має бути істотно меншою за відповідну постійну часу об'єкта керування ТО, щоб уникнути внесення неприпустимої динамічної похибки в процес регулювання.

Математична модель об'єкта керування у вигляді передаточної функції має наступну форму:

$$W_o(p) = \frac{K_o \cdot e^{-p \cdot \tau_o}}{T_o \cdot p + 1} = \frac{0.2 \cdot e^{-90 \cdot p}}{450 \cdot p + 1}$$

Відповідно до технологічних вимог для вирощування огірків у тепличних умовах, робочий температурний діапазон повітря повинен становити від 18 до 25 °С.

Найбільш придатним за межами вимірювання до зазначеного діапазону є температурний датчик ТСМ–8034М, параметри якого наведено на рисунку 4.1.



Рисунок 4.1 Загальний вигляд датчика ТСМ – 8034М

Постійна часу об'єкта керування становить 450 секунд. Виходячи з цього, максимально допустиме значення постійної часу для вимірювального перетворювача, при якому його інерційність не матиме суттєвого впливу на динаміку системи, не повинна перевищувати одну десяту від значення  $T_O$ , тобто 45 секунд.

Як видно з наведеного, постійна часу температурного датчика ТСМ–8034М дорівнює 30 секунд, що менше допустимого порогового значення. Це свідчить про те, що інерційністю даного пристрою можна знехтувати у процесі регулювання.

Обраний вимірювальний перетворювач повністю відповідає вимогам щодо точності та динаміки вимірювання температури в межах заданого діапазону. Його технічні характеристики наведені в таблиці 4.1.

Таблиця 4.1 Технічні характеристики датчика ТСМ-8034М

Вид, тип	ТСМ-8034М
Градусання	23
Межі вимірювання, °С	-50...+85
Показник теплової інерції, с	30

Датчики виконують функцію перетворення фізичного параметра — в даному випадку температури — у відповідний електричний вихідний сигнал. Завдяки багатошаровій конструкції чутливого елементу, пристрій демонструє стабільну роботу навіть за складних умов експлуатації, зокрема при високій вологості, забрудненості, наявності маслянистих речовин чи хімічно активних середовищ.

Математичне представлення динамічних властивостей датчика описується передаточною функцією, яка має наступний вигляд:

$$W_{ce}(s) = K_{ce} \quad (4.1)$$

$$K_{ce} = R_0 \cdot \alpha = 53 \cdot 4.26 \cdot 10^{-3} = 0.266, \quad (4.2)$$

де  $R_0$  – опір ТСМ-8034М при  $0^\circ\text{C}$  (рис. 4.2),

$\alpha$  – температурний коефіцієнт опору (для міді  $\alpha=4,26 \cdot 10^{-3}$  ( $1/^\circ\text{C}$ ))

$$W_{ce}(s) = 0,266$$

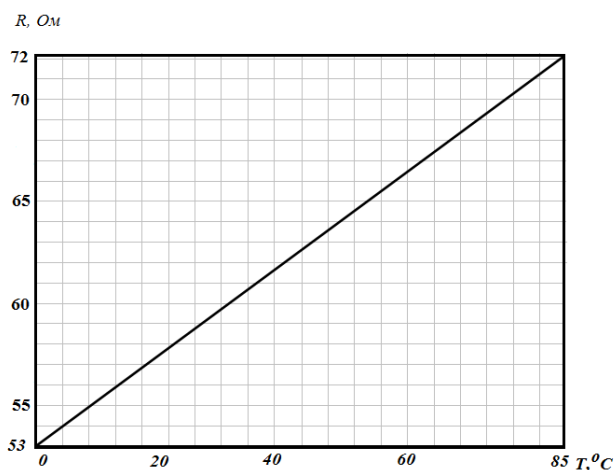


Рисунок 4.2 Статична характеристика термоперетворювача

На основі передаточної функції будується графік динамічної характеристики термоперетворювача, що подано на рисунку 4.3.

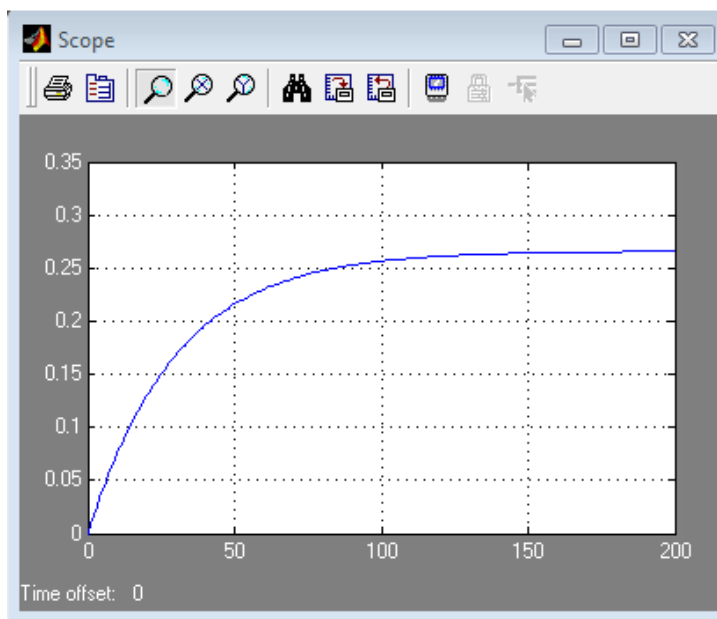


Рисунок 4.3 Динамічна характеристика термоперетворювача

#### 4.1.2 Вибір виконавчого механізму та створення його математичної моделі

Електричний однообертний виконавчий механізм (МЕО) являє собою електромеханічну систему, яка забезпечує привід для запірно-регулюючої трубопровідної арматури в автоматизованих системах керування технологічними процесами.

Принцип його дії полягає у перетворенні електричного сигналу в обертальний рух вихідного валу відповідно до команди, що надходить від регулюючого або керуючого елемента системи.

Встановлення механізмів типу МЕО здійснюється безпосередньо біля регулюючих органів. З'єднання з арматурою реалізується через жорстку систему тяг або важелів, що забезпечує надійність і точність передавання руху.

Виходячи з аналізу технічних параметрів однообертних виконавчих механізмів, доцільним є вибір моделі двигуна МЕО 4/100. Його технічні характеристики наведено в таблиці 4.2.

Таблиця 4.2 Технічні характеристики МЕО 4/100

Тип	МЕО 4/100
Номінальний момент на валу Н*м	39.2
Пусковий момент Н*м	58.8
Час одного оберту с	100
Максимальний кут повороту вих. валу, град.	90
Напруга живлення, В	220
Споживана потужність В*А	64
Габаритні розміри, мм	260x330x300

$$W_{BM}(s) = \frac{K_{BM}}{s} \quad (4.3)$$

$$K_{\text{ВМ}} = \frac{1}{T_{\text{ВМ}}} = \frac{1}{100} = 0.01, \quad (4.4)$$

де  $T_{\text{ВМ}}$  – час одного оберту виконавчого механізму.

$$W_{\text{ВМ}}(s) = \frac{0.01}{s}$$

На основі передаточної функції виконавчого механізму побудовано його динамічну характеристику, що представлена на рисунку 4.4.

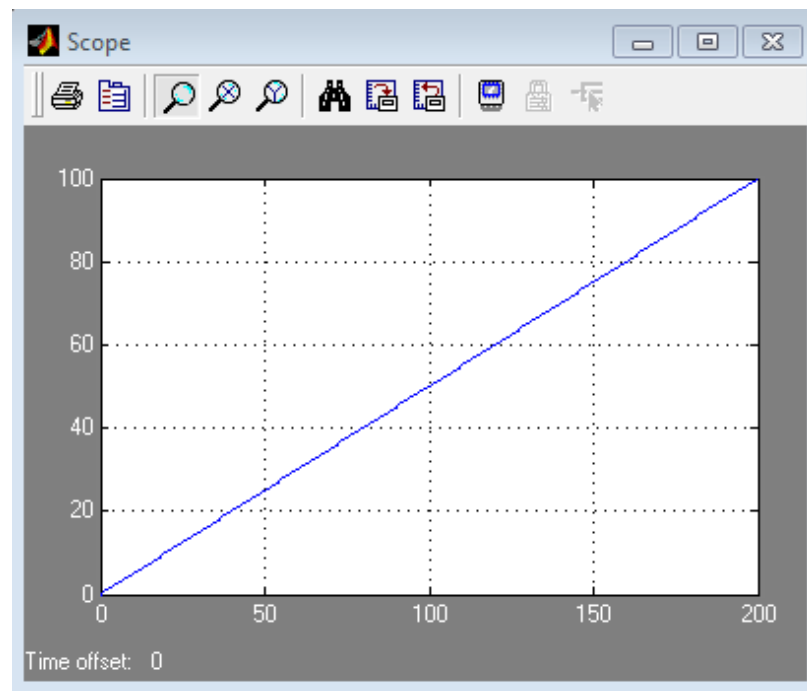


Рисунок 4.4 Динамічна характеристика виконавчого механізму  
МЕО-4/100



Для побудови принципів електричних схем використовуються умовні графічні символи, а також позиційні (літерно-цифрові) позначення згідно з вимогами стандарту **ГОСТ 2.710-81 «Позначення буквено-цифрові в електричних схемах»**.

Позиційне позначення складається з трьох складових частин. Перша частина містить одну або дві літери латиницею, що вказують на тип елемента. Друга частина — цифрове позначення номера пристрою. Третя — додаткове буквене позначення функціонального призначення елемента (за потреби). Обов'язковими компонентами умовного позначення є тип та номер елемента. Вказувати функцію дозволяється, але не є обов'язковим.

При розробці принципів електричних схем слід дотримуватись таких основних правил:

1. Схема оформлюється таким чином: у лівій частині аркуша розміщується безпосередньо графічна частина схеми, а в правій — перелік використаних елементів.
2. Усі елементи схеми (наприклад, реле КМ1–КМ3, кнопки SB1–SB5, перемикачі SA, автоматичні вимикачі QF1, SF тощо) відображаються в положенні спокою — тобто у стані відсутності електроживлення та зовнішніх механічних впливів.
3. Контакти реле та кнопкових елементів зображуються з урахуванням напрямку дії сили: при горизонтальному розташуванні кола — зверху вниз, при вертикальному — зліва направо.
4. Для позначення елементів використовується дволітерний код. Позиційні позначення проставляються безпосередньо біля умовного графічного зображення елементів — праворуч або зверху.
5. Лінії зв'язку між компонентами повинні складатися лише з вертикальних і горизонтальних відрізків та мати мінімальну кількість перетинів і зламів для покращення читабельності схеми.

### 4.3 Розробка схеми електричної з'єднань

Відповідно до вимог ГОСТ 2.702-75 «Правила выполнения электрических схем», схема з'єднань відображає електричні зв'язки між складовими частинами установки або виробу. Такі схеми створюються на основі принципів схем живлення і слугують орієнтиром при монтажних та пуско-налагоджувальних роботах.

Розроблена схема з'єднань побудована з урахуванням таких загальних положень:

Схема з'єднань виконана для щита керування типу ЩРМ-2, який містить усі необхідні комутаційні пристрої.

Елементи, зокрема КМ1–КМ3, FU та інші, розташовані на задній стінці щита згідно з вимогами ГОСТ 2.702-75.

Усі лінії зв'язку та кабелі промарковані відповідно до ГОСТ 2.710-81 «Обозначения буквенно-цифровые в электрических схемах», що гарантує правильність ідентифікації кожного елемента.

Під час створення схеми було застосовано адресний метод з'єднання, що передбачає такі особливості:

Щит ЩРМ-2 відображається в одній площині з поділом на зони:

На передній панелі розташовано автоматичні вимикачі QF, SF, кнопки SB1–SB5, сигнальну лампу HL, дисплей контролера SK1, перемикачі SA та сигнальний пристрій (дзвоник) HA.

На лівій бічній панелі знаходиться клемник XT, що виконує функцію зв'язку між передньою і задньою панелями та силовою частиною (двигуни M1–M2, кінцеві вимикачі SQ1 та SQ2).

На задній панелі встановлено комутаційні реле, пристрої захисту двигунів — КМ1–КМ3, F1–F3.

Виводи елементів показано у вигляді кіл із зазначенням маркування. Якщо заводське маркування відсутнє, використовуються умовні позначення арабськими цифрами, які пояснюються у відповідних надписах.

Адресний спосіб зображення передбачає відсутність прямих ліній зв'язку між апаратами на схемі. Натомість біля точки приєднання проводу проставляється

адреса — цифрова або літерно-цифрова — того елемента, до якого йде з'єднання (відповідно до позиційного позначення у принциповій схемі або порядкового номера). Такий підхід значно спрощує читання схеми, зменшуючи її візуальну перевантаженість (рис. 4.6).

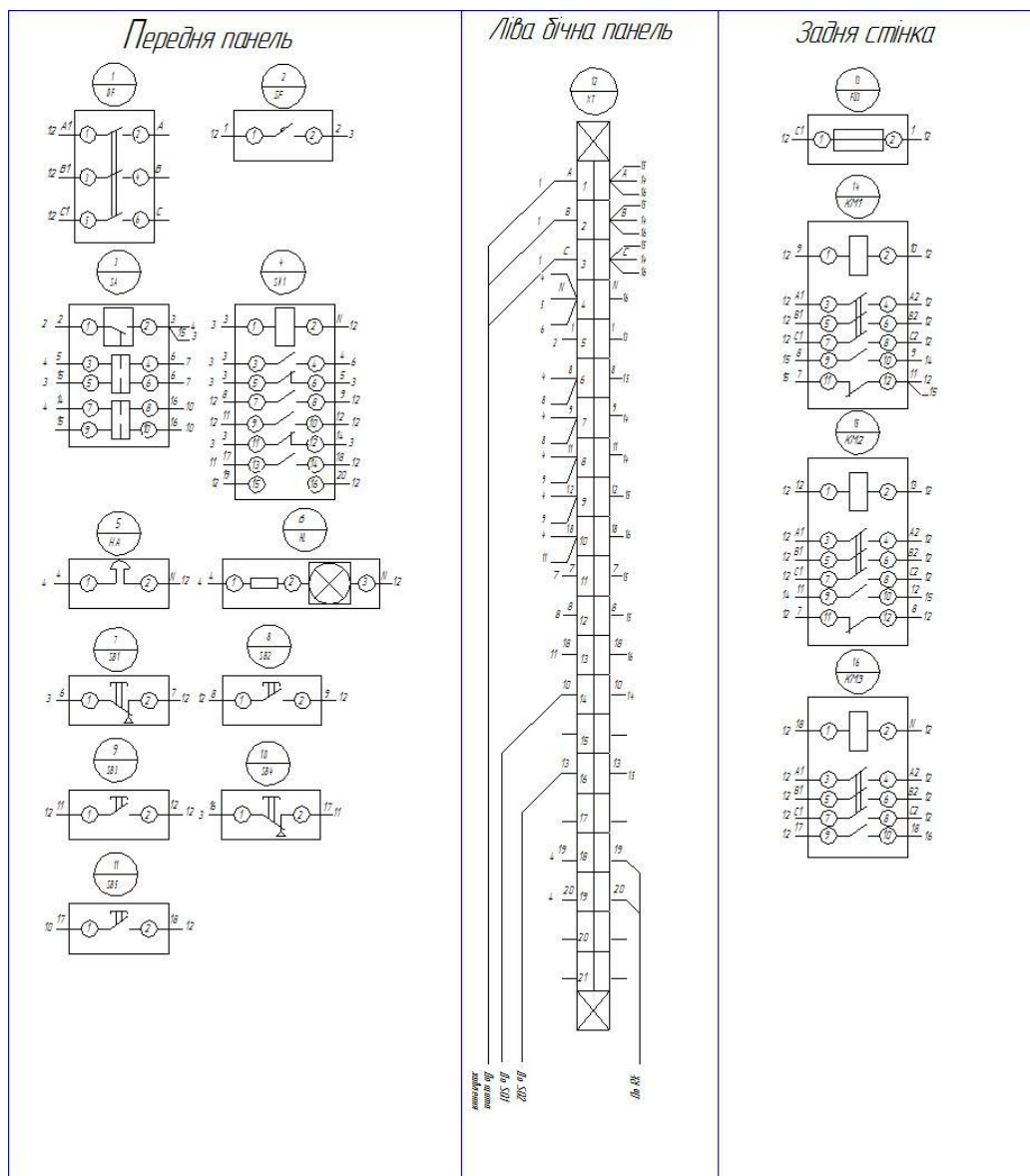


Рисунок 4.6 Схема електрична з'єднань (адресний спосіб виконання)

#### 4.4 Розробка схеми електричної підключень

Відповідно до вимог ГОСТ 2.702-75, схеми підключення відображають зовнішні електричні з'єднання апаратури, шаф, щитів, пультів тощо. Вони створюються на основі принципів електричних схем живлення, специфікацій обладнання і приладів, а також креслень, що показують розміщення технологічного обладнання та трубопроводів у виробничому приміщенні.

На практиці для зображення схем підключення застосовують два підходи: графічний і табличний. Найбільш розповсюдженим є графічний метод. У такій схемі умовними графічними символами позначають:

- первинні вимірювальні перетворювачі;
- прилади й елементи автоматизації, що встановлюються поза межами щитів;
- коробки з'єднувальні, відгалужувальні, протяжні, а також місця підключення термопар;
- кабелі та електропроводку, що прокладається поза щитами;
- забірну арматуру, комутаційні затискачі, розташовані поза щитовим обладнанням.

Прилади, шафи, пульти та інші компоненти на схемі умовно зображають у вигляді прямокутників або кіл, усередині яких зазначають їхні позначення або найменування.

На лініях, що відображають електричні зв'язки (кабелі чи проводи), обов'язково вказують номер підключення, марку провідника, його переріз, довжину, а також, у разі потреби, тип та параметри захисної труби, якщо прокладка здійснюється в ній.

Схеми підключення виконуються не в масштабі, а у форматі, що максимально зручний для експлуатації та візуального сприйняття (рис. 4.7).

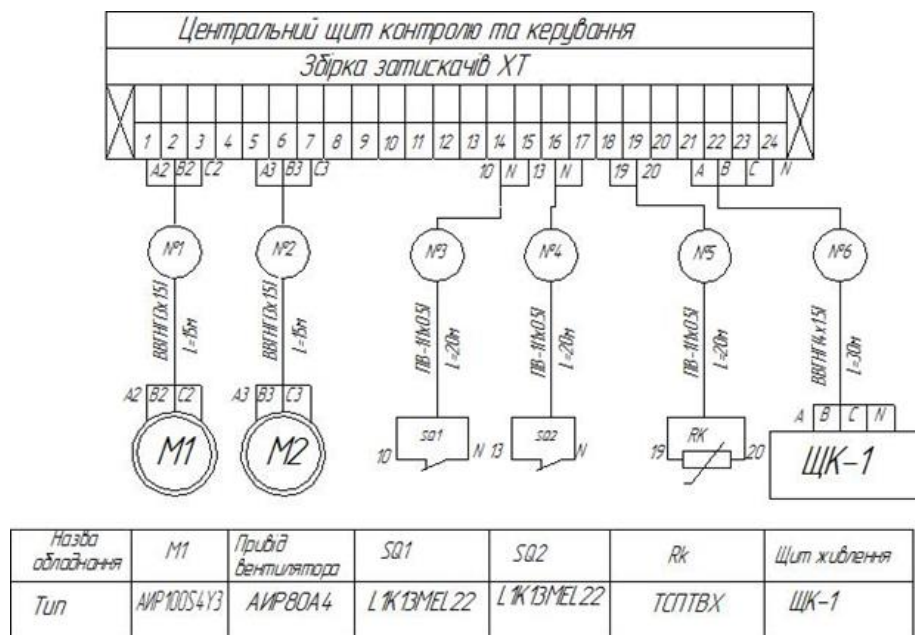


Рисунок 4.7 Схема електрична підключень

## 4.5 Вибір щита керування

Щити і пульти - це пости керування, контролю, сигналізації електрифікованих і автоматизованих об'єктів. На них розміщують апаратуру керування, контрольно-вимірювальні прилади, засоби сигналізації та захисту. На фасадних сторонах щитів і пультів можуть бути нанесені накладні надписи (пояснюючі), освітлювальні пристрої тощо.

Щити і пульти на стадії проектування вибирають на підставі таких нормативних документів: ГОСТ 20504-81 «Система унифицированных типовых конструкций агрегатных комплексов ГСП. Типы и основные размеры», ДСТУ 3288-95 (ГОСТ 26032-96) "Система уніфікованих типових конструкцій агрегатних комплексів. Загальні технічні умови". ГОСТ 36.13-76 "Щиты и пульты систем автоматизации технологических процессов", додаток до ГОСТ 36.13-76 розроблені інструкції РМ4-107-82.

Згідно з вище вказаними нормативними документами щити і пульти розраховано на розміщення їх у закритих приміщеннях із температурою навколишнього середовища від  $-30$  до  $+50^{\circ}\text{C}$  за відносної вологості не більше як 80%. Промисловість випускає також щити та пульти спеціального призначення, які розраховані на більш високі або низькі температури, підвищену вологість, наявність агресивного середовища тощо. Щити та пульти умовно позначають згідно з вимогами ГОСТ 36.13-76.

Шафові щити використовують:

- у виробничих приміщеннях, що характеризуються запиленістю, великою вологістю та можливістю механічного пошкодження апаратури й внутріш-ньощитових проводів;
- для розміщення допоміжної апаратури (реле, джерел живлення) всередині щита;
- для захисту обслуговуючого персоналу від дотиків до відкритих струмоведучих частин апаратури та затискачів.

Враховуючи габаритні розміри всіх пристроїв схеми керування температурою повітря в блочній теплиці, що розміщуються на передній і задній панелях (ГОСТ 36.13-76), вибираємо щит шафовий малогабаритний ЩРНМ-2 (рис. 4.8) (500x400x220).

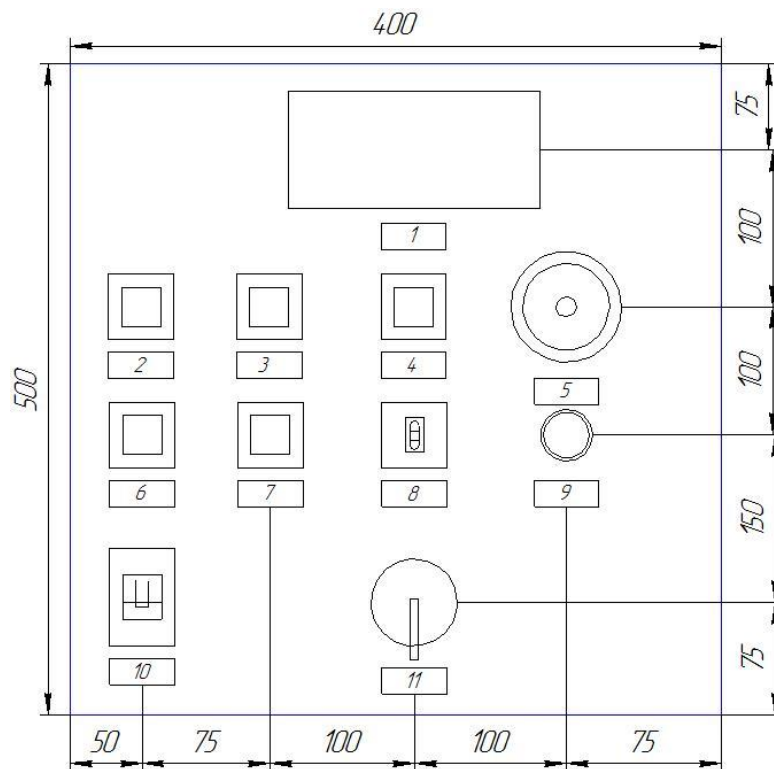


Рисунок 4.8 Схема загального вигляду щита керування

## 4.6 Вибір пускозахисної апаратури

Електричні апарати пуску, керування та захисту - це електротехнічні пристрої та механізми, що призначені для вмикання і вимикання, забезпечення певного режиму роботи і для захисту електроспоживачів і електричних кіл. Апарат може виконувати одну або кілька з вказаних функцій.

Електричні апарати вибирають за родом струму, напругою, потужністю, числом полюсів, вимогами до електричного захисту від ненормальних режимів роботи електроспоживачів і електричних кіл та за виконанням залежно від умов навколишнього середовища.

Вибір двигунів М1, М2, автоматичних вимикачів QF та SF. При підвищенні чи зниженні фактичного значення температури від заданого приводяться в рух фрамуги: відкриваються чи закриваються відповідно. Для регулювання фрамугами обираємо двигун (М1) типу АІР100S4У3 (рис. 4.9), технічні характеристики якого наведено у табл.4.3.



Рисунок 4.9 Зовнішній вигляд двигуна АІР100S4У3

Таблиця 4.3 – Технічні характеристики двигуна АИР100S4У3

Серія	АИР
Частота обертання, об/хв	1500
Потужність, кВт	3
Напруга, В	360
Номінальна частота обертання, об/хв	1410
Номінальний струм при 380В,А	7,3
ККД, %	82
Коефіцієнт потужності	0,82
Іп/Ін	7
Мп/Мн	2,0
Мтах/Мн	2,2

Для забезпечення примусової циркуляції повітря в тепличному приміщенні передбачено встановлення вентилятора, привід якого здійснюється за допомогою електродвигуна. З урахуванням експлуатаційних умов та необхідної потужності, для цього призначення обрано електродвигун типу АИР80А4.

Зовнішній вигляд двигуна наведено на рисунку 4.10, а його основні технічні характеристики представлено в таблиці 4.4.



Рисунок 4.10 Зовнішній вигляд двигуна типу АИР80А4

Таблиця 4.4 Технічні характеристики електродвигуна АИР80А4

Тип двигуна	Асинхронний
Тип ротора	Короткозамкнутий
Кількість фаз	3
Напруга, В	380
Номинальний струм, А	3.04
Потужність, кВт	1.1
Коефіцієнт потужності, %	76
Частота обертання, об/хв	1500
ККД, %	74.5

Відповідно до принципової електричної схеми, для захисту електродвигунів від струмових перевантажень та коротких замикань передбачено використання автоматичних вимикачів.

У якості основного апарата захисту обрано автоматичний вимикач **QF** виробництва компанії **Schneider Electric**, модель **Acti9 iK60N** номіналом **16 А**, з відключаючою здатністю **6 кА**. Зовнішній вигляд пристрою представлено на рисунку 4.11, а його технічні характеристики наведено в таблиці 4.5.



Рисунок 4.11 Приклад зовнішнього вигляду автоматичного вимикача Acti9 iK60N

Таблиця 4.5 Основні технічні параметри автоматичного вимикача Acti9 iK60N

Номинальний струм	16А
Відключаюча здатність	6кА
Механічний ресурс	20 000
Електричний ресурс	10 000
Перетин підключаемого дрота	1-16мм <sup>2</sup>
Ширина модуля	18мм
Монтаж	TH35(DIN)(одна шина)

Вибір автоматичних вимикачів здійснюється з урахуванням ряду технічних вимог, серед яких основними є:

– номінальна напруга пристрою повинна відповідати робочій напрузі електричної мережі, у яку він буде встановлений:

$$U_{ав} \geq U_{м}; \quad (4.5)$$

– номінальний струм автоматичного вимикача повинен відповідати або незначно перевищувати номінальний струм електродвигуна, який він захищає. Це забезпечує надійне спрацювання захисту у разі перевантаження, але виключає його необґрунтоване відключення під час нормальної роботи.

$$I_{ном.ав.} \geq I_{ном.дв.}; \quad (4.6)$$

$$I_{ном\Sigma} = I_{н1} + I_{н2} = 6,7 + 2,75 = 9,45 \text{ А}$$

$$I_{н.ав.} = 16 \text{ А}$$

$$(16 \geq 9,45)$$

– номінальні струми теплового та електромагнітного розчіплювачів повинні відповідати номінальному струму електродвигуна або бути незначно вищими, що дозволяє забезпечити захист як від тривалих перевантажень, так і від короткочасних струмових піків.

$$I_{ном.розч.} \geq I_{ном.ед.}; \quad (4.7)$$

$$I_{нр} \geq 1,25 \cdot I_{н.дв.}, \quad (4.8)$$

$$1,25 \cdot I_{н.дв.} = 1,25 \cdot 9,45 = 11,8 \text{ А};$$

$$I_{нр} = 16 \text{ А};$$

$$(16 \geq 11,8),$$

де  $I_{нр}$  - номінальний струм теплового розчіплювача автоматичного вимикача, А;

Для розрахунку струму спрацювання теплового розчіплювача враховується коефіцієнт 1,25, який забезпечує запас чутливості захисту в умовах робочих пускових струмів.

З урахуванням цього, для захисту кола керування обрано автоматичний вимикач ЕТІМАТ6, зовнішній вигляд якого представлено на рисунку 4.12. Його основні технічні характеристики наведено в таблиці 4.6.



Рисунок 4.12 Зовнішній вигляд автоматичного вимикача ЕТІМАТ6

Таблиця 4.6 – Технічна характеристика автоматичного вимикача ЕТІМАТ6

Номінальний струм	6А
Відключаюча здатність	6кА
Механічний ресурс	20 000
Електричний ресурс	10 000
Перетин підключаемого дрота	1-25мм <sup>2</sup>

Максимальний струм, який може розмикати автоматичний вимикач становить  $3I_{\text{НОМ}}$ . Оскільки струм, який споживає схема керування  $I_{\text{НОМ}}=1,7\text{А}$ , то максимальний струм вимикача:

$$3I_{\text{НОМ}}=3\cdot 1,7=5,1\text{А} \quad (4.9)$$

Таким чином, на підставі проведених розрахунків можна зробити висновок, що вибрані автоматичні вимикачі повністю відповідають вимогам до захисту відповідних елементів системи.

### Вибір запобіжника FU.

Плавкі запобіжники є найбільш економічно вигідними та конструктивно простими пристроями для захисту електричних кіл і обладнання від коротких замикань та перевантажень.

При виборі запобіжника для захисту кола керування враховується те, що його номінальний струм повинен бути не меншим за суму номінальних струмів усіх елементів, що входять до цього кола, або трохи перевищувати її.

Струм плавкої вставки розраховується за наступною формулою:

$$I_{пл.вст.} \geq 1,2 \cdot I_{кк.}, \quad (4.10)$$

де  $I_{кк.}$  – струм, що споживає коло керування

$$1,2 \cdot 1,7 = 2,04$$

Вибираємо запобіжник типу CN 8x32 gL/gG 4A з вставкою на струм 4 А та на номінальний струм запобіжника 4 А, які розраховані на роботу в мережах змінного струму напругою до 660 В.

### Вибір регулятора температури.

Терморегулятор — це електронний пристрій, призначений для автоматичного контролю та підтримання заданого температурного режиму в обраній зоні. У межах даного проєкту — це температура повітря в блочній теплиці.

Регулятор температури оснащується вбудованим або зовнішнім термодатчиком (іноді передбачене одночасне використання обох типів). Датчик монтується у точці, вільній від безпосереднього впливу нагрівальних елементів, і забезпечує регулятор інформацією про реальну температуру повітря в контрольованій зоні. Виходячи з отриманих даних, пристрій формує керуючі сигнали на виконавчі механізми системи опалення.

Для реалізації функцій автоматичного регулювання в даній системі обрано восьмиканальний терморегулятор **ТМ 5103** виробництва компанії **Елемер**. Зовнішній вигляд пристрою зображено на рисунку 4.13, а його технічні характеристики наведено в таблиці 4.7.



Рисунок 4.13 Зовнішній вигляд регулятора ТМ 5103

Таблиця 4.7 Технічні характеристики регулятора температури ТМ 5103

Назва	Значення
Діапазон напруг живлення	від 90 до 264 В змінного (від 47 до 63 Гц) струму
Потужність, що споживається, ВА, не більше	18
Кількість вимірювальних входів у приладі	8
Час обробки одного каналу, с	0,6
Напруга вбудованого джерела живлення	(24±3) В постійного струму (максимум 150 мА)
Інтерфейс зв'язку з комп'ютером	RS-485, RS-232L
Габаритні розміри корпусу, мм	144 ' 169 ' 50,5
Маса приладу, кг, не більше	1,0

Вибір електромагнітних пускачів КМ1, КМ2, КМ3. Електромагнітні пускачі є ключовими елементами систем автоматизованого керування електрообладнанням, зокрема — асинхронними електродвигунами. Їх основне призначення полягає у забезпеченні дистанційного пуску, зупинки та захисту двигунів у разі аварійних режимів.

Підбір пускачів виконується з урахуванням таких параметрів:

За напругою живлення:

$$(U_n > U_m) \quad (4.11)$$

$$660 \text{ В} > 220 \text{ В}$$

За струмом

$$(I_{\text{ном-п}} \geq I_{\text{ном.дв.}}) \quad (4.12)$$

$$10 \text{ А} \geq 6,7 \text{ А (М1)}$$

$$6,3 \text{ А} \geq 2,75 \text{ А (М2)}$$

За конструкцією і виконанням.

Оскільки в заданій принциповій схемі теплові реле захисту не передбачені, вибір електромагнітних пускачів здійснюється лише за двома основними критеріями: номінальною напругою живлення та номінальним струмом.

У даному проєкті для керування відповідним електродвигуном обрано електромагнітний пускач **КМЗ** моделі **ПМА 0000**, виробництва **НВО «Етал»**. Це нереверсивний пускач на номінальний струм **6,3 А**. Його зовнішній вигляд наведено на рисунку 4.14, а технічні характеристики — у таблиці 4.8.



Рисунок 4.14 Зовнішній вигляд магнітного пускача - ПМА 0000

Таблиця 4.8 Характеристики магнітного пускача ПМА 0000

Номінальна напруга ізоляції пускача, В	660
Номінальний струм, на який розрахований пускач, А	6.3
Механічна/ комутаційна, цикли	20 млн/3 млн

Для реалізації реверсивного керування двигунами у схемі використовуються магнітні пускачі КМ1 та КМ2. У якості відповідного рішення обрано низьковольтні реверсивні пускачі типу ПМЛ 1501, виробництва НВО «Етал», розраховані на номінальний струм 10 А.

Даний тип пускачів повністю відповідає вимогам проєкту за електричними та конструктивними параметрами. Їх зовнішній вигляд наведено на рисунку 4.15, а технічні характеристики — у таблиці 4.9.



Рисунок 4.15 Зовнішній вигляд магнітного пускача - ПМЛ 1501

Таблиця 4.9 Характеристики комутаційного апарата ПМЛ 1501

Номінальна напруга по ізоляції, В	660
Струм головного ланцюга, А	10
Потужність, що витрачається котушкою пускача, Вт:	
при звичайній роботі	$8 \pm 1,8$
при запуску двигуна	$68 \pm 8$
Максимальна частота включення під навантаженням, раз/год	2400

Вибір кінцевих вимикачів SQ1, SQ2. Під час підбору кінцевих вимикачів враховуються такі параметри, як номінальна напруга та струм кола керування, кількість і тип контактів (нормально замкнені або нормально розімкнені), а також конструктивне виконання, яке повинно відповідати умовам експлуатації.

Максимальне значення струму, який здатен надійно розмикати кінцевий вимикач, становить:

$$I_{к.в.} \geq I_{к.к.} + I_{м.п.} \quad (4.13)$$

Відповідно до електричної принципової схеми, обрано кінцеві вимикачі, які відповідають вимогам за струмовими характеристиками та умовами експлуатації.

Для позиції SQ1 використовується кінцевий вимикач типу LS31P з номінальним струмом 10 А. Даний вимикач характеризується надійністю, компактністю та стійкістю до механічних навантажень. Його конструкція забезпечує стабільну роботу в системах автоматичного керування.

Для позиції SQ2 обрано кінцевий вимикач типу LS40P з номінальним струмом 12 А, що дозволяє застосовувати його в колах з дещо вищим навантаженням. Обидва пристрої мають необхідну кількість контактів для реалізації функцій контролю положення виконавчих механізмів:

$$10 \geq 1,7 + 6,3 \text{ (А)}$$

$$10 \geq 8 \text{ (А)}$$

Для SQ2:

$$12 \geq 1,7 + 10 \text{ (А)}$$

$$12 \geq 11,7 \text{ (А)}$$

Вибрані кінцеві вимикачі відповідають вимогам стандартів **ГОСТ 9601-84** та **ГОСТ 24682-81**, що регламентують технічні умови та експлуатаційні характеристики даного типу апаратів. Таким чином, з урахуванням проведених розрахунків і вимог до надійності, обрані кінцеві вимикачі є доцільними для реалізації функцій контролю у системі керування.

Вибір кнопок керування електродвигунами SB1 – SB5. Кнопки керування серій KE та ПKE призначені для комутації електричних кіл керування при напрузі змінного струму до 500 В з частотою 50 Гц, а також у колах постійного струму напругою до 220 В. Вони широко застосовуються у пультах та щитах для керування електродвигунами, освітленням, сигналізацією тощо.

Відповідно до принципової електричної схеми, для реалізації функцій керування у цьому проєкті обрано кнопки ПKE211УЗ, технічні характеристики яких наведено в таблиці 4.10. Обрані кнопкові елементи відповідають стандарту ГОСТ 15150-69, що визначає кліматичне виконання і умови експлуатації електротехнічних виробів.

Таблиця 4.10 Технічні характеристики ПKE211УЗ

Номінальна напруга ізоляції, В	660
Номінальна напруга змінного струму частотою 50 Гц, В	400
Номінальна напруга постійного струму, В	220
Мінімальна робоча напруга, В	12
Максимальний робочий струм, А	10
Мінімальний робочий струм, А	0.1

### Вибір перемикача SA.

Відповідно до принципової електричної схеми, для керування колом передбачено встановлення перемикача типу **ПК16-12 С2029 УЗ**, що має три фіксовані положення: «2» – «0» – «1». Його зовнішній вигляд представлено на рисунку 4.16, а основні технічні характеристики — у таблиці 4.11.

Кулачкові перемикачі серії **ПК** призначені для комутації електричних кіл керування з робочою напругою від **24 В до 440 В**, як у мережах постійного, так і змінного струму частотою **50 або 60 Гц**. Такі перемикачі характеризуються надійною конструкцією, зносостійкістю та простотою монтажу, що робить їх придатними для використання у промислових системах автоматизації.



Рисунок 4.16 Зовнішній вигляд перемикача ПК16-12 С2029 У3

Таблиця 4.11 Технічні характеристики перемикача ПК16-12 С2029 У3

Номінальна робоча напруга, В	240
Номінальна напруга ізоляції	660
Механічна зносостійкість, циклів	100000
Комутаційна зносостійкість, циклів	3000
Максимальна кількість вмикань за годину	120

### **Вибір сигнальної лампи НЛ для кола керування.**

У системі автоматичного керування передбачено використання світлової індикації для оперативного сповіщення про відхилення температури в теплиці від встановлених меж. Для реалізації цієї функції в колі керування передбачена сигнальна лампа НЛ, яка активується при зниженні або перевищенні температури повітря відносно заданого значення.

Для зазначених умов обрана світлова індикаційна лампа ХВ2-EV165, яка відповідає вимогам до надійності, яскравості сигналу та сумісності з елементами керування. Технічні характеристики лампи наведено в таблиці 4.12.

Таблиця 4.12 Характеристики сигнальної лампи ХВ2-EV165

Номінальна напруга, В	230/24
Номінальний струм, мА	300
Діаметр монтажного отвору, мм	22
Діапазон робочих температур, °С	-5...+60

### Вибір пристрою звукової сигналізації (НА).

Для реалізації функції звукового оповіщення про критичні зміни температурного режиму або інші позаштатні ситуації в системі обрано дзвоник гучного звучання типу EBL-100. Пристрій працює від мережі змінного струму з напругою 220 В і має споживаний струм 300 мА, що забезпечує достатню гучність для своєчасного реагування персоналу на аварійні сигнали.

### Вибір клемника ХТ.

Для організації безпечного, компактного та надійного з'єднання фазних і нульових провідників у щиті керування використано затискний клемник Legrand 034211. Даний елемент дозволяє забезпечити чітке розгалуження і впорядковане підключення проводів у межах електричної схеми.

З урахуванням загальної кількості необхідних з'єднань для реалізації проєкту передбачається встановлення двох штук клемників цього типу. Технічні характеристики клемної групи наведено у таблиці 4.14.

Таблиця 4.14 Технічні характеристики клемника Legrand 034211

Максимальний переріз, мм <sup>2</sup>	4
Номинальний переріз, мм <sup>2</sup>	2.5
Діаметр, мм	2.5
Максимальний струм, А	24
Кількість клем	12
Діапазон робочих температур, °С	25...+55
Габаритні розміри, мм	15.5x94x12.3

### Вибір проводів живлення електродвигунів М1, М2.

Визначення площі поперечного перерізу струмопровідних жил проводу, кабелю або шнура здійснюється з урахуванням двох основних вимог: обмеження гранично допустимого нагріву провідника та забезпечення достатньої механічної міцності в умовах експлуатації.

При визначенні кількості жил, що прокладаються в одній трубці або використовуються у складі багатожильного кабелю, нульовий робочий провід у чотирипровідних системах трифазного струму, а також заземлююча жила, до розрахунку не включаються.

Площу поперечного перерізу жил обирають, виходячи з тривало допустимого струму, що протікає по провіднику в номінальному режимі.

Для електродвигунів М1 і М2 величина тривало допустимого струму розраховується за наступною формулою:

$$I_{НОМ} = \frac{10^3 P_{НОМ}}{\sqrt{3} U_{НОМ} \eta_{НОМ} \cos \varphi_{НОМ}} = \frac{3000}{\sqrt{3} \cdot 380 \cdot 0,82 \cdot 0,83} = \frac{3000}{448} = 6,7(A). \quad (4.14)$$

Вибираємо кабель ВВГнГ 3х1,5 на 0,66кВ з максимальним струмом роботи 21А, довжиною 30 м.

### Вибір проводу для живлення кола керування.

Оскільки номінальне струмове навантаження у колі керування не перевищує 2 А, для його живлення обрано провід типу ПВ-1 1×0,5, відповідно до ГОСТ 6323-79. Це одножильний мідний провід у полівінілхлоридній ізоляції з площею поперечного перерізу 0,5 мм<sup>2</sup>, тривало допустимий струм якого становить 11 А.

Враховуючи просторове розміщення елементів у системі, необхідна загальна довжина проводу складає 60 метрів.

### **Вибір кабелю для живлення шафи керування.**

Розрахунок тривало допустимого струму живлення для шафи керування виконується за наступним співвідношенням:

$$I_{ш.тр.доп.} = \sum I_{тр.доп.} = 6,7 + 2,75 + 1,7 = 11,15A \quad (4.15)$$

де  $\sum I_{тр.доп.}$  - сума тривало допустимих струмів електродвигуна і кола керування.

### **Вибір кабелю для живлення шафи керування.**

З урахуванням умов експлуатації та струмового навантаження системи, для живлення шафи керування обрано кабель типу ВВГнг 4×1,5 з номінальною напругою 0,66 кВ та довжиною 30 метрів.

Даний кабель відповідає вимогам ГОСТ 16442-70 і має мідні струмопровідні жили з полівінілхлоридною ізоляцією. Площа поперечного перерізу кожної силової жили становить 1,5 мм<sup>2</sup>, що забезпечує необхідний рівень струмопровідності, механічної міцності та надійності для безпечної роботи в системі автоматичного керування.

## РОЗДІЛ 5.

### АНАЛІЗ ЯКОСТІ ФУНКЦІОНУВАННЯ АВТОМАТИЧНОЇ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ

#### 5.1 Оцінка якості автоматичної системи керування

Рисунок 5.1 ілюструє структурно-алгоритмічну схему системи автоматичного регулювання температури повітря та ґрунту в теплиці. При проєктуванні подібних систем необхідно враховувати вимоги до їх стійкості. Зокрема, варто забезпечити певний запас, який гарантує, що навіть при зміні параметрів у процесі роботи система не вийде за межі стійкого функціонування.

Запас стійкості визначає, наскільки поточний стан системи віддалений від критичної межі, за якою вона переходить у нестійкий режим. Це дозволяє оцінити надійність роботи автоматизованої системи в умовах можливих збурень або коливань параметрів.

Оцінка стійкості системи може бути здійснена за допомогою відповідних математичних критеріїв. У даному випадку для аналізу використовується імпульсна теорема, приклад застосування якої наведено в додатку.

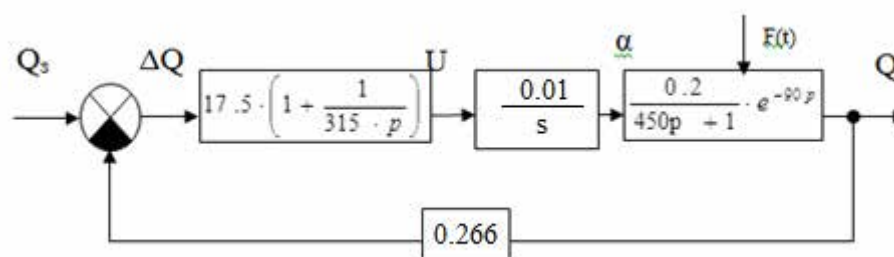


Рисунок 5.1. Структурно-алгоритмічна схема САК.

Чіткі кількісні оцінки запасу стійкості системи як за амплітудною, так і за фазовою складовою виконуються із застосуванням **методу Найквіста**. Для реалізації цього підходу необхідно попередньо визначити **передаточну**

**функцію розімкненої системи**, яка буде слугувати основою для побудови розімкненої частотної характеристики системи автоматичного керування.

Передаточна функція розімкненої системи визначається шляхом множення передаточних функцій окремих елементів, з'єднаних послідовно. Це відповідає структурі системи, представленої у структурно-алгоритмічній схемі.

Передаточна функція системи автоматичного керування, що розробляється у межах даного дипломного проєкту, обчислюється згідно з такою загальною формулою:

$$W_{ROZ}(p) = W_d(p) \cdot W_{REG}(p) \cdot W_{BM}(p) \cdot W_O(p) \quad (5.1)$$

$$W_{ROZ}(p) = \frac{0.2}{450p+1} \cdot e^{-90p} \cdot 17.5 \cdot \left(1 + \frac{1}{315 \cdot p}\right) \cdot \frac{0.01}{p} \cdot 0.266;$$

На основі побудованої амплітудно-фазової частотної характеристики розімкненої системи (рис. 5.2) можна зробити висновок про її стійкість. Критерій Найквіста дозволяє оцінити це, виходячи з форми траєкторії: якщо вона не охоплює критичну точку  $(-1; j0)$ , то замкнена система зберігає стійкий режим роботи, за умови, що розімкнена також є стійкою.

У цьому випадку характеристика перетинає дійсну вісь у точці з координатами  $(-0,2; j0)$ , що свідчить про відповідність умові стійкості. Запас стійкості по модулю дозволяє кількісно оцінити, наскільки система віддалена від критичної межі втрати стійкості. Цей запас обчислюється як відстань від точки перетину до критичної точки на комплексній площині.

Для розрахунку використовуємо вираз у логарифмічному масштабі, що дає змогу отримати результат у децибелах:

$$\Delta L = 20 \lg \frac{1}{|W_{ROZ}(j \cdot \omega_o)|} = 20 \lg \frac{1}{|-0.22|} = 13.2 \text{ дБ.} \quad (5.2)$$

Фазовий запас характеризує допустиме збільшення фазового зсуву в системі на частоті зрізу при незмінному коефіцієнті підсилення, за якого

система ще залишатиметься стійкою. Це значення показує, наскільки може зрости затримка по фазі, перш ніж система досягне межі втрати стійкості.

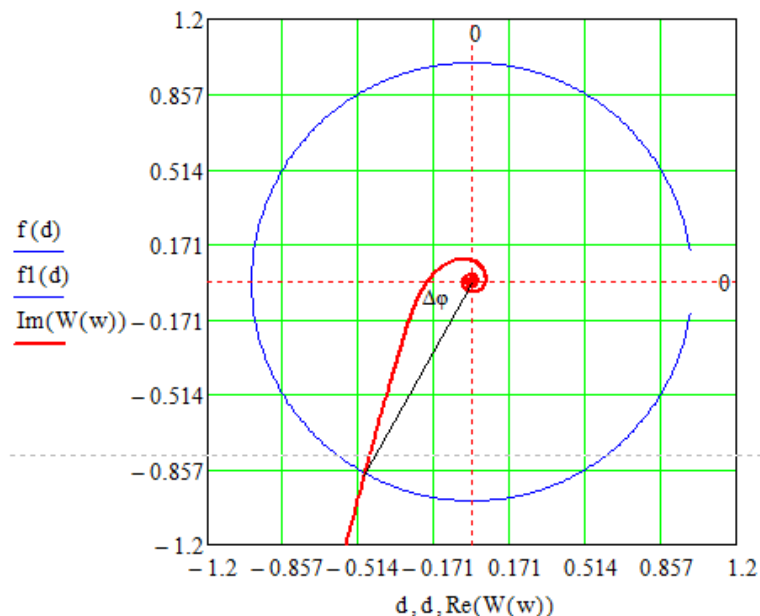


Рисунок 5.2. Амплітудо-фазо частотна характеристика САК.

Запас стійкості по фазі  $\Delta\varphi$  визначається кутом створеним дійсною від'ємною піввіссю і прямою, проведеною з початку координат через точку перетину АФЧ з колом одиничного радіуса з центром на початку координат  $\Delta\varphi = 57^\circ$ .

Запаси стійкості по амплітуді і фазі задовольняють вимогам стійкості системи  $\Delta L = 10 \dots 20$  дБ,  $\Delta\varphi = 30 \dots 60^\circ$

До систем автоматичного регулювання висуваються вимоги не лише в контексті забезпечення їх стійкої роботи. Щоб система могла ефективно виконувати покладені на неї функції, процес регулювання повинен відповідати визначеним критеріям якості функціонування. Хоча конкретні вимоги можуть відрізнятися залежно від об'єкта керування, є низка універсальних показників, які дозволяють повноцінно оцінити якість більшості систем керування.

Зазвичай, аналіз якості проводиться на основі перехідної характеристики системи, що відображає реакцію системи на одиничне збурення. До основних показників, які характеризують якість перехідного процесу, належать:

- Час регулювання  $t_p$  — це проміжок часу, за який регульована величина досягає і залишається в межах допустимого відхилення від встановленого значення. У більшості випадків за норму вважається відхилення, яке не перевищує 5%. Цей показник відображає швидкодію системи.
- Перерегулювання — максимально можливе перевищення регульованої величини щодо заданого значення, що оцінюється у відсотках.
- Коливальність — наявність і тривалість коливань навколо заданого значення під час стабілізації.
- Усталена похибка — остаточне відхилення вихідної величини після завершення перехідного процесу.

З урахуванням розрахованих параметрів здійснюється побудова перехідного процесу замкнутої системи регулювання, що дозволяє візуально оцінити відповідність характеристик заданим технічним вимогам виглядає наступним чином:

$$W_{ZAM}(p) = \frac{W_{ROZ}(p)}{1 + W_{ROZ}(p)}. \quad (5.3)$$

Перехідний процес отримаємо за виразом:

$$h(t) = \frac{2}{\pi} \cdot \left[ \int_0^1 \operatorname{Re}[W_{ZAM}(w)] \cdot \frac{\sin(w \cdot t)}{w} dw \right]. \quad (5.4)$$

На рис. 5.3 побудовано перехідний процес САК.

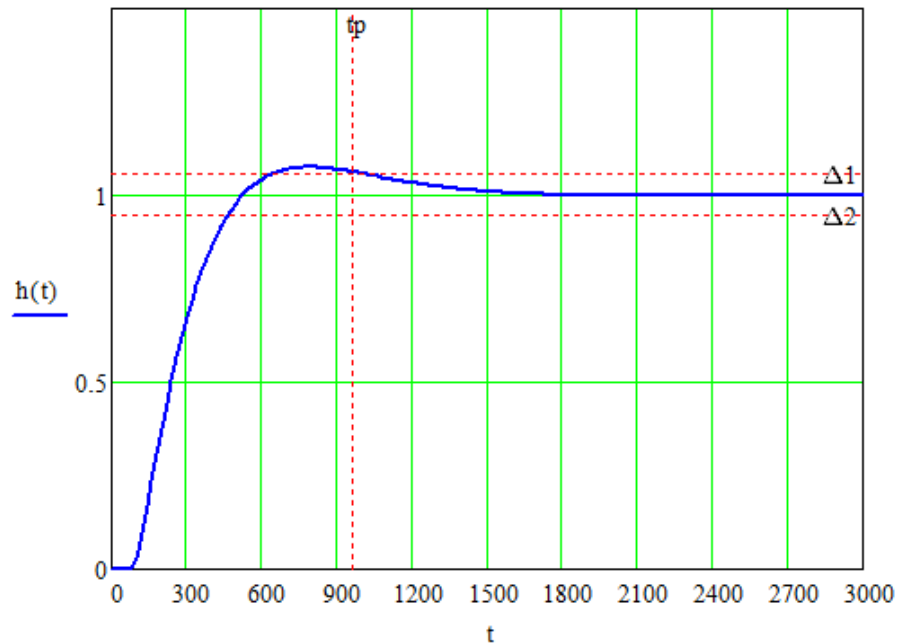


Рисунок 5.3 Перехідний процес САК.

Аналізуючи отриману графічну залежність перехідного процесу в системі автоматичного керування, можна зробити висновок, що тривалість регулювання становить приблизно 966 секунд, а кількість коливань у процесі стабілізації —  $n = 1$ , що свідчить про слабку коливальність системи.

Подальше оцінювання дозволяє визначити усталену похибку, яка становить:

$$\Delta = y(\infty) \cdot 5\% = 1 \cdot 5\% = 0.05 \quad (5.5)$$

Перерегулювання не виходить за межі 20 % і складає:

$$\sigma = \frac{y_{\max} - y(\infty)}{y(\infty)} \cdot 100\% = \frac{1.075 - 1}{1} \cdot 100\% = 7.5\% \quad (5.6)$$

## 5.2 Розрахунок надійності системи автоматичного керування

Під надійністю розуміють здатність технічного об'єкта виконувати свої функціональні завдання протягом певного проміжку часу, зберігаючи при цьому експлуатаційні характеристики в межах, визначених нормативами.

Параметри надійності, що стосуються окремих компонентів автоматизованої системи, визначаються згідно з положеннями ГОСТ 27.002-89, який встановлює основні поняття та критерії оцінки працездатності технічних засобів.

Отже, загальна інтенсивність відмов системи становить:

$$\sum \lambda_i = 1/\text{год} \quad (5.7)$$

У таблиці 5.1 представлено дані щодо інтенсивності відмов для окремих елементів системи. Розрахунок загальної інтенсивності відмов кожного виду елементів здійснюється шляхом множення індивідуального значення інтенсивності відмови на кількість відповідних одиниць обладнання.

Сумарна інтенсивність відмови всієї системи визначається як алгебраїчна сума інтенсивностей відмов усіх її складових.

Відповідно до проведених обчислень, загальна інтенсивність відмови системи становить:

$$\lambda_p = 17,14 \cdot 10^{-6}$$

Відповідно середній час безвідмовної роботи САК дорівнює:

$$T_{\text{сер}} = \frac{1}{\sum \lambda_i} = \frac{1}{17,14 \cdot 10^{-6}} = 58343,06 \text{ год} \quad (5.8)$$

Приймаємо, що строк нормальної експлуатації становить  $t = 10000$  год.  
Тоді, знайдемо результуючу імовірність відмови  $P(t)$  за  $t = 10000$  годин:

$$P_{рез}(t) = e^{-k \cdot \sum \lambda_i \cdot t}, \quad (5.9)$$

Таблиця 5.1 Інтенсивність відмов елементів системи

Позначення на схемі	Назва елемента	Кількість елементів, шт.	Інтенсивність відмов, $\lambda_i \cdot 10^{-6}$ , 1/год	Загальна інтенсивність відмов $\lambda_i \cdot 10^{-6}$ , 1/год
M1, M2	Електродвигун	2	5,24	10,48
QF1	Автоматичний вимикач	1	0,175	0,175
FU	Плавкий запобіжник	1	0,5	0,5
SF	Автоматичний вимикач	1	0,175	0,175
SA	Перемикач режиму	1	0,175	0,175
SK	Регулятор	1	0,5	0,5
RK	Терморезистор	1	0,087	0,087
HA	Прилад звукової сигналізації	1	0,05	0,05
R1	Резистор	1	0,087	0,087
HL1	Прилад світлової сигналізації	1	0,025	0,025
KM1-KM3	Магнітний пускач	3	0,25	0,75
SB1-SB5	Кнопковий вимикач	5	0,063	0,315
SQ1, SQ2	Кінцевий вимикач	2	0,161	0,322
	Механічні контакти	14	0,25	3,5

де  $k$  – коефіцієнт, що враховує вплив зовнішнього середовища (приймаємо 1);

$t$  – час експлуатації.

$$P_{рез}(t) = e^{-1.17.14 \cdot 10^{-6} \cdot 10^4} = 0,84$$

З урахуванням проведених розрахунків можна дійти висновку, що **ймовірність виникнення відмови системи протягом 10 000 годин експлуатації становить 0,84**. Це свідчить про високу ймовірність виходу з ладу хоча б одного з компонентів у межах заданого терміну, що потребує врахування при побудові системи технічного обслуговування та резервування.

У випадках, коли обчислене значення **результуючої надійності системи** виявляється **нижчим за нормативне**, передбачене технічними вимогами ( $P_{рез}(t) = 0,94$ ), використовують резервування як схемний метод підвищення надійності.

$$P_2(t) = e^{-1 \cdot (2 \cdot 0,175 + 0,5 + 2 \cdot 0,087 + 0,05 + 0,025 + 3 \cdot 0,25 + 5 \cdot 0,063 + 2 \cdot 0,161 + 14 \cdot 0,25) \cdot 10^{-6} \cdot 10^4} = 0,942 \quad (5.10)$$

$P_2(t)$  - імовірність роботи схеми, що резервуванню не підлягає.

$$P_1(t) = \frac{P_3}{P_2} = \frac{0,94}{0,942} = 0,998, \quad (5.11)$$

$P_1(t)$  – імовірність безвідмовної роботи схеми, що резервується.

$$\lambda_1 = (2 \cdot 5,24 + 1 \cdot 0,5 + 1 \cdot 0,175) \cdot 10^{-6} = 11,2 \cdot 10^{-6}, \quad (5.12)$$

$\lambda_1$  – Сумарне значення **інтенсивності відмов** елементів, які входять до складу тієї частини системи, що підлягає резервуванню, визначається як **сума інтенсивностей відмов усіх компонентів цієї ділянки.**

$$m = \frac{\log(1 - 0,998)}{\log(1 - e^{-1 \cdot 11,2 \cdot 10^{-2}})} = \frac{-2}{-0,975} \approx 3, \quad (5.13)$$

де  $m$  – кількість зарезервованих елементів.

## РОЗДІЛ 6. ТЕХНІКО-ЕКОНОМІЧНЕ ОБГРУНТУВАННЯ

Впровадження засобів автоматизованого контролю та керування дозволяє суттєво підвищити ефективність виробничих процесів, зокрема за рахунок зростання продуктивності праці, скорочення експлуатаційних витрат, а також зменшення терміну окупності капіталовкладень.

Для кількісної оцінки економічного ефекту використовується інтегральний показник ефективності, яким виступають зведені розрахункові витрати. Цей показник включає в себе річні експлуатаційні витрати, а також частину інвестиційних витрат, приведену до річного еквівалента.

Розрахунок зведених витрат здійснюється за формулою:

$$V_{зв} = C + E_n \cdot K, \quad (6.1)$$

де  $V_{зв}$ - зведені витрати, грн./рік;  $C$ - річні експлуатаційні витрати, грн./рік;  $E_n$ - номінальний коефіцієнт ефективності капітальних вкладень, 1/рік;  $K$ -капітальні витрати, грн.

Річні експлуатаційні витрати складаються з таких основних компонентів: оплата праці обслуговуючого персоналу ( $C_z$ ), витрати на поточне технічне обслуговування та ремонт обладнання електрифікації й автоматизації ( $C_{пт}$ ), витрати на спожиту електроенергію або інші енергоресурси ( $C_e$ ), а також витрати на допоміжні матеріали ( $C_d$ ).

Оплата праці персоналу визначається з урахуванням кількості обслуговуючих працівників та погодинної тарифної ставки. У розрахунках приймається, що тарифна ставка становить 6,25 грн за годину. Фонд заробітної плати обчислюється за формулою:

$$C_z = N \cdot Z \cdot Z_{зм} T, \quad (6.2)$$

де  $N$ -кількість робітників в одній зміні,  $N=1$ ;  $Z$ - кількість змін на добу,  $Z=3$ ;  $Z_{зм}$ - середня заробітна плата робітника за добу 50 грн.;  $T$ - кількість робочих днів,  $T=152$ .

Підставивши дані у формулу (6.2) матимемо:

$$C_z = 1 \cdot 3 \cdot 50 \cdot 152 = 22800 \text{ грн.}$$

Амортизаційні відрахування приймаються на рівні 14% від балансової вартості обладнання. Витрати на поточний ремонт також обчислюються як 5% від тієї ж вартості. Витрати на енергоресурси визначаються згідно з обсягом споживання електроенергії та діючим тарифом 0,1875 грн/кВт·год. У результаті, витрати на енергоносії становлять:

$$C_e = 5472 \text{ грн.}$$

Окрім цього, інші прямі витрати приймаються в розмірі 1% від загальних експлуатаційних витрат.

Річні експлуатаційні витрати обчислюються за формулою:

$$C = C_z + C_a + C_{пт} + C_e + C_d,$$

де:

$C_z$  — витрати на заробітну плату,

$C_a$  — амортизаційні відрахування,

$C_{пт}$  — витрати на поточний ремонт,

$C_e$  — витрати на енергоносії,

$C_d$  — інші витрати.

Після підстановки значень отримаємо:

$$C = (22800 + 0,14 \times 7671 + 0,05 \times 7671 + 5472) \times 1,01 = 30026,78 \text{ грн.}$$

Балансова вартість обладнання розраховується за формулою:

$$B_v = B_{дв} + B_d + B_p + B_c,$$

де:

$B_{дв} = 650$  грн — вартість одного двигуна (2 шт.),

$B_d = 84$  грн — вартість одного датчика (9 шт.),

$V_p = 735$  грн — вартість регулятора (1 шт.),

$V_c = 920$  грн — вартість виконавчого механізму (1 шт.).

Після обчислення маємо:

$$B_v = 650 \times 2 + 84 \times 9 + 735 + 920 = 3711 \text{ грн.}$$

Капітальні вкладення включають балансову вартість обладнання, вартість доставки, зберігання та монтажу (25% від  $B_v$ ), витрати на прокладку електропроводки (11% від  $B_v$ ) і додаткові витрати на рівні 2% від усієї суми:

$$K_v = (B_v + 0,25 \times B_v + 0,11 \times B_v) \times 1,02 = (3711 + 0,25 \times 3711 + 0,11 \times 3711) \times 1,02 = 5147,89 \text{ грн.}$$

Зведені витрати розраховуються за формулою:

$$V_{zv} = C + E_n \times K_v,$$

де  $E_n = 0,15$  — норматив ефективності капітальних вкладень.

Підставляючи значення:

$$V_{zv} = 30026,78 + 0,15 \times 5147,89 = 30798,96 \text{ грн.}$$

Загальні зведені витрати за 10 років експлуатації розраховуються за формулою:

$$V_{zag} = V_{zv} + E_n \times 10 \times K_v = 30798,96 + 0,15 \times 10 \times 5147,89 = 38520,79 \text{ грн.}$$

Собівартість продукції визначається з урахуванням зведених витрат на функціонування системи, до яких додаються питомі витрати на підживлення, воду та інші прямі витрати, пов'язані з вирощуванням однієї одиниці продукції.

$$C_v = \frac{\sum B}{Q}, \quad (6.7)$$

де  $Q$ —кількість продукції виробленої протягом року;  $Q=2500$  т;

$\sum B$ —сума всіх витрат на виробництво продукції  $\sum B=4659300$  грн

$$C_v = 4659300/2500 = 1863,72 \text{ грн/т.}$$

Прибуток визначимо за формулою:

$$PR = \Pi - C_v, \quad (6.8)$$

де Ц-ціна одиниці продукції

$ПР=2000-1863,72=136,28$  грн/т.

Рентабельність виробництва визначається за формулою:

$$P=ПР/Св=136,28/1863,72=7 \%. \quad (6.9)$$

Розрахунок строку окупності капітальних вкладень дає змогу оцінити, за який період інвестиції, вкладені в автоматизовану систему, повністю повернуться за рахунок отриманого економічного ефекту

$$T = \frac{K_k}{G} = \frac{38520.79}{34070} \approx 1,2 \text{ міс}, \quad (6.10)$$

де  $K_k$  – витрати, пов'язані зі створенням нової системи, грн.;

$G$  – збільшення прибутку після введення в роботу розробленої САК, грн.

Результати проведених розрахунків свідчать, що строк окупності нового контролера, впровадженого в систему автоматичного керування мікрокліматом блочної теплиці для вирощування огірків, становить приблизно 1,2 місяця. Такий короткий період окупності підтверджує економічну доцільність використання автоматизації та високу ефективність капіталовкладень.

## ВИСНОВОК

У межах дипломного проєкту виконано проєктування системи автоматичного керування температурним режимом для вирощування огірків у зимово-весняній блочній теплиці. Було проведено комплексний аналіз сучасних літературних джерел у галузі автоматизації закритого ґрунту, що дало змогу обґрунтовано обрати оптимальний закон регулювання.

На основі технологічних вимог і технічних характеристик об'єкта розроблено імітаційну модель функціонування системи, в якій реалізовано пропорційно-інтегральний закон керування за допомогою восьмиканального регулятора типу TM5103.

У процесі дослідження були визначені основні показники якості регулювання: статична похибка  $\Delta = 0,05$ , кількість коливань  $n = 1$ , перерегулювання  $\sigma = 7,5\%$ , час регулювання  $T = 966$  с. Отримані характеристики відповідають технологічним вимогам вирощування овочевої продукції в умовах закритого ґрунту.

Економічне обґрунтування показало, що впровадження розробленої САК забезпечує строк окупності в межах 1,2 місяця, що підтверджує її високу ефективність та доцільність впровадження в тепличне господарство.

## СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. *Інтелектуальні системи керування біотехнічними об'єктами* / В.Лисенко, Н.Заєць, М. Гачковська, О. Савчук. – К.: КомПрінт, 2019. – 549 с..
2. Лисенко В.П., Решетюк В.М., Штепа В.М., Заєць Н.А. та ін. Системи штучного інтелекту: нечітка логіка, нейронні мережі, нечіткі нейронні мережі, генетичний алгоритм. – К: НУБіП України, 2014. – 336с.
3. Мірошник В.О., Лендел Т.І., *Моделювання біотехнічних об'єктів в галузях АПК. Методичні вказівки*. К.: НУБіП України 2016 р., 146 с.
4. Лисенко В.П., Решетюк В.М., Цигульов І.Т. *Основи автоматики: теорія і практика (ч. 2)*/ Лисенко В.П., Решетюк В.М., Цигульов І.Т. – К., Освіта України, 2015. – 454 с.
5. *Методи сучасної теорії управління: підручник* / А.П.Ладанюк, Н.М.Луцька, В.Д.Кишенько, Л.О. Власенуко, В.В.Іващук – Київ,: видавництво Ліра-К, 2018. – 368 с.
6. *Автоматизація технологічних процесів та виробництв./Лукін В.Є., Мірошник В.О., Цигульов І.Т. // Навчальний посібник*. – К.: ЦП «Компринт», 2016. – 472 с.
7. Ладанюк А.П., Решетюк В.М., Кишенько В.Д., Смітюх Я.В. *Інноваційні технології в управлінні складними біотехнологічними об'єктами агропромислового комплексу* - К.: Центр учбової літератури, 2014.- 360 с.
8. *Навчальний посібник « Основи комп'ютерної техніки . Компоненти , системи , мережі »* . Автори С.О.Кравчук , В.О.Шонін у двох виданнях : К.: Політехніка : Каравела , 2005; К.: Каравела , 2006. 344 с
9. Лисенко В.П., Решетюк В.М., Цигульов І.Т. *Основи автоматики: теорія і практика (ч. 1). Видання 2-е, перероблене і доповнене*. – К., Освіта України, 2013. –720 с.
10. *Цифрові системи керування. Навчальний посібник* / Головінський Б.Л., Шуруб Ю.В., Дудник А.О., Лисенко В.П. – К.: Видавничий центр НУБіП України, 2016. – 110 с.



