

**НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ БІОРЕСУРСІВ
І ПРИРОДОКОРИСТУВАННЯ УКРАЇНИ
Факультет ІНФОРМАЦІЙНИХ ТЕХНОЛОГІЙ**

ПОГОДЖЕНО

Декан факультету Інформаційних
технологій

_____ Ігор БОЛБОТ

(підпис)

«__» _____ 2026 р.

ДОПУСКАЄТЬСЯ ДО ЗАХИСТУ

Завідувач кафедри Комп'ютерних систем,
мереж та кібербезпеки

_____ Дмитро КАСАТКІН

(підпис)

«__» _____ 2026 р.

БАКАЛАВРСЬКА КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

На тему: «Комп'ютерно інтегрована система керування крапельним поливом у
промисловій теплиці»

Спеціальність F7 «Комп'ютерна інженерія»

Освітньо-професійна програма «Комп'ютерна інженерія»

Гарант освітньої програми

канд. фіз.-мат. наук, доцент

(підпис)

Євгеній НІКІТЕНКО

Керівник бакалаврської

кваліфікаційної роботи

канд. фіз.-мат. наук, доцент

(підпис)

Ігор БОЛБОТ

Виконав

(підпис)

Максим КОВАЛЬЧУК

КИЇВ-2026

**НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ БІОРЕСУРСІВ
І ПРИРОДОКОРИСТУВАННЯ УКРАЇНИ
Факультет ІНФОРМАЦІЙНИХ ТЕХНОЛОГІЙ**

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри

комп'ютерних систем, мереж та кібербезпеки
канд. пед. наук, доцент _____ Дмитро КАСАТКІН
« ____ » _____ 20 ____ р.

З А В Д А Н Н Я

**ДО ВИКОНАННЯ БАКАЛАВРСЬКОЇ КВАЛІФІКАЦІЙНОЇ РОБОТИ
ЗДОБУВАЧУ**

Ковальчуку Максиму Олександровичу

(прізвище, ім'я, по батькові)

Спеціальність «Комп'ютерна інженерія»

Освітньо-професійна програма «Комп'ютерна інженерія»

Тема кваліфікаційної бакалаврської роботи

«Комп'ютерно інтегрована система керування крапельним поливом у промисловій теплиці»

затверджена наказом ректора НУБіП України від «10» 12 2025р. № 3071 «С»

Термін подання завершеної роботи на кафедру «15» 05 2026 р.

Вихідні дані до бакалаврської кваліфікаційної роботи

комп'ютерно-інтегрована система прецизійного регулювання вологості повітряного середовища та субстрату в умовах теплиці з використанням датчиків вологості, насосної установки, електромагнітних клапанів, системи крапельного зрошення та модуля туманоутворення.

Перелік питань, що підлягають дослідженню:

Аналіз об'єкта автоматизації та його динамічних характеристик; визначення передавальної функції; вибір вимірювальних елементів, регулювальних органів, виконавчих механізмів і контролера; вибір закону керування; розробка функціонально-структурної, структурно-алгоритмічної та електричної принципової схем; дослідження якості й стійкості роботи системи; розробка програмного забезпечення; кошторисні розрахунки.

Перелік графічного матеріалу (за необхідності).

функціонально-технологічна схема комбінованої системи зволоження повітря та ґрунту в теплиці; функціонально-структурна та структурно-алгоритмічна схеми системи керування; електрична принципова схема системи керування.

Дата видачі завдання “ 13 ” 10 2025 р.

Керівник бакалаврської

кваліфікаційної роботи
канд. фіз.-мат. наук, доцент

(підпис)

Ігор БОЛБОТ

Завдання взяв до виконання

(підпис)

Максим КОВАЛЬЧУК

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів кваліфікаційної бакалаврської роботи	Строк виконання етапів роботи	Примітка
1	Аналіз вимог до системи	18.04.2026	Виконано
2	Проектування системи	05.04.2026	Виконано
3	Реалізація системи	12.04.2026	Виконано
4	Тестування системи	24.04.2026	Виконано
5	Оформлення пояснювальної записки	21.05.2026	Виконано

Студент _____ Ковальчук М.О.

(підпис)

(ініціали та прізвище)

Керівник проекту (роботи) _____ Болбот І.М.

(підпис)

(ініціали та прізвище)

ЗМІСТ

ВСТУП	7
РОЗДІЛ 1. ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА ВИРОБНИЧОГО ОБ'ЄКТА	9
1.1. Опис об'єкта управління та стан його автоматизації.	9
1.1.1. Живильні розчини для огірка.	16
1.1.2. Живильні розчини для томату.	19
1.2. Вимоги до систем автоматичного регулювання вологості ґрунту в теплиці.	22
1.3. Мета та задачі автоматизації технологічного процесу.	26
РОЗДІЛ 2. РОЗРОБКА КОМП'ЮТЕРНО-ІНТЕГРОВАНОЇ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ ТЕХНОЛОГІЧНИМ ПРОЦЕСОМ	28
2.1. Аналіз динаміки та визначення передатної функції об'єкта.	28
2.2. Вибір сприймаючого елемента системи керування.	34
2.3. Вибір регулюючого органу та виконавчого механізму системи керування.	38
2.4. Вибір закону управління.	42
2.5. Функціонально-структурна та структурно-алгоритмічна схеми системи керування.	44
2.6. Дослідження якості та стійкості роботи системи.	46
2.7. Вибір контролера.	50
2.8. Розробка програмного забезпечення системи управління температурним режимом.	54
РОЗДІЛ 3. МОНТАЖ, НАЛАГОДЖЕННЯ ТА ЕКСПЛУАТАЦІЯ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ	58
3.1. Електрична принципова схема системи керування.	58
3.2. Монтаж та налагодження елементів системи керування.	59
3.3. Експлуатація системи керування.	59

РОЗДІЛ 4. КОШТОРИСНІ РОЗРАХУНКИ	64
ВИСНОВКИ	67
СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ	69
ДОДАТКИ	72

ВСТУП

Щорічно в тепличних господарствах зростає актуальність забезпечення стабільного мікроклімату високої якості. Оптимізація технологій підтримки параметрів середовища є ключовим чинником інтенсифікації врожайності, покращення біометричних показників культур та раціоналізації ресурсоспоживання. Ефективний менеджмент енерго- та водоресурсів дозволяє мінімізувати собівартість продукції та підвищити рентабельність виробництва. Сучасні автоматизовані системи управління (АСУ) мають забезпечувати прецизійне регулювання температурного режиму, вологості повітря та субстрату, інтегруючи роботу виконавчих механізмів та інженерних мереж у єдиний функціональний комплекс.

На сучасному етапі спостерігається активна модернізація тепличних комплексів шляхом розширення парку виконавчих систем і впровадження інноваційних засобів автоматизації. Зі збільшенням кількості технологічних підсистем критичного значення набуває вибір стратегії оптимального керування та забезпечення когерентності функціонування всіх ланок. До базових структурних компонентів сучасної теплиці належать підсистеми вентиляції, теплопостачання, зволоження, асиміляційного освітлення та іригації.

Особливе місце в структурі агротехнічних заходів посідає система крапельного зрошення, яка забезпечує дискретне та рівномірне надходження вологи до кореневої зони. Впровадження даної технології сприяє детермінованому використанню водних ресурсів, зниженню енерговитрат і підтримці гомеостазу вологості ґрунту. Автоматизація іригаційних процесів дозволяє здійснювати динамічне регулювання водоподачі на основі моніторингу параметрів субстрату, що нівелює вплив антропогенного фактора.

Інтенсивні технології культивування вимагають стабілізації параметрів мікроклімату впродовж усього вегетаційного циклу. Вологісний режим є одним із

домінантних факторів, що визначають динаміку росту та продуктивність фітоценозу. Порушення гідротермічного балансу призводить до фізіологічного стресу рослин, поширення патогенів та зниження якості продукції. Таким чином, автоматичний контроль вологості повітря і ґрунту є фундаментальним завданням сучасного захищеного ґрунту.

Автоматизація технологічних операцій у спорудах захищеного ґрунту забезпечує суттєве зниження трудомісткості та собівартості виробництва при одночасному підвищенні рівня енергоозброєності та загальної культури господарювання. Застосування передових АСУ мікрокліматом та зрошенням дозволяє збільшити врожайність овочевих культур на 10–15 %, забезпечуючи сталий розвиток галузі через ефективну експлуатацію природного та енергетичного потенціалу.

РОЗДІЛ 1. ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА ВИРОБНИЧОГО ОБ'ЄКТА

1.1. Опис об'єкта управління та стан його автоматизації.

Теплиця являє собою світлопрозору захисну споруду, огорожувальні конструкції якої виконані з полімерних плівок, скла або полікарбонату, що забезпечує формування специфічного мікрокліматичного режиму. Дана капітальна споруда дозволяє здійснювати цілорічне культивування рослин шляхом застосування комплексу технічних засобів регулювання параметрів середовища. На відміну від малогабаритних парників, архітектура теплиць передбачає виконання всього циклу агротехнічних операцій безпосередньо всередині культиваційного простору. Основним функціональним призначенням теплиць є виробництво ранньої та позасезонної овочевої продукції, а також вирощування розсадного матеріалу для подальшої реплікації у відкритий або захищений ґрунт.

За морфологічними ознаками профілю поперечного перерізу теплиці класифікують на ангарні та блокові. Візуалізація конструктивних особливостей блокової теплиці представлена на відповідних схемах типових проектів.



Рис.1.1. Загальний вигляд об'єкта управління.

Блокова архітектура культивацийних споруд ґрунтується на об'єднанні декількох ангарних модулів, у яких бічні перегородки замінені опорними стійками. Вузли сполучення покрівельних елементів суміжних секцій завширшки 6,4 м оснащені водовідвідними жолобами, що одночасно виконують функцію тримальних конструкцій. Таке компонування дозволяє створювати цілісні виробничі масиви площею від 1 до 3 га, що сприяє високій технологічності заводського виготовлення металоконструкцій та мінімізації капітальних витрат на етапі будівництва. Оптимальним вважається модуль площею 1 га, тоді як промислові комплекси можуть об'єднувати від 3 до 10 таких блоків, охоплюючи загальну площу в межах 18–60 га.

Ангарні споруди площею від 600 до 3000 м² характеризуються двосхилим або арковим покриттям без проміжних внутрішніх опор. Тримальний каркас із металу або деревини фіксується безпосередньо на фундаменті або стінових стійках. Основними перевагами обох типів є високий коефіцієнт інсоляції та можливість ефективного застосування засобів механізації. Проте ангарні теплиці через значні габаритні розміри мають збільшену площу огорожень, що призводить до інтенсивніших тепловтрат.

За типом світлопрозорого матеріалу виділяють скляні, плівкові та полікарбонатні конструкції. Використання скла поступово обмежується через його крихкість та низьку стійкість до снігових навантажень. Полімерні плівки характеризуються високою проникністю для активної сонячної радіації, проте мають низьку теплову інерцію, що спричиняє різкі нічні перепади температур. Найбільш перспективним матеріалом є стільниковий полікарбонат, який поєднує низьку горючість із високою ударною міцністю, значним термічним опором та здатністю витримувати механічні навантаження.

Регулювання вологості повітря є критичним процесом, обумовленим термодинамічною залежністю, за якої зі зростанням температури гігроскопічна ємність повітря підвищується. Гідротермічний режим у теплиці детермінується інтенсивністю повітрообміну, що вимагає функціонування ефективних систем

вентиляції. Неперервний моніторинг вологості є обов'язковим, оскільки дефіцит води в критичні фази онтогенезу, зокрема під час проростання або цвітіння, призводить до втрати фертильності пилку та формування стерильних суцвіть. Автоматизація технологічних операцій є ключовим механізмом забезпечення відповідності мікроклімату нормативним вимогам, що сприяє інтенсифікації виробництва та зниженню собівартості продукції.

Таблиця 1.1. Оптимальні параметри мікроклімату в блочних теплицях.

Фактори	Огірки		Томати	
	до плодоношення	в період плодоношення	до плодоношення	в період плодоношення
Температура повітря в сонячний день, °C	22-24	26-28	21-23	23-25
Температура повітря в похмурий день, °C	20-22	22-24	19-21	20-22
Температура повітря вночі, °C	19-21	20-22	15-17	17-19
Температура ґрунту, °C	22-24	23-25	16-18	18-20
Вологість повітря, %	65-70	80-85	60-65	65-70
Концентрація CO ₂ в повітрі, %	0,15-0,20	0,15-0,20	0,15-0,20	0,15-0,20
Швидкість руху повітря. м/с	0,20-0,25	0,25-0,35	0,25-0,35	0,35-0,50

Крапельне зрошення визначається як метод мікрозрошення, за якого робочий розчин подається безпосередньо в зону локалізації кореневої системи рослин. Ця технологія, що отримала промислове впровадження з початку 1960-х років, продемонструвала високу ефективність і набула глобального розповсюдження. Системи такого типу є універсальними та застосовуються для культивування овочевих, плодово-ягідних і декоративних культур як у відкритому ґрунті, так і в умовах захищеного ґрунту.

На відміну від методу дощування, крапельне зрошення базується на дискретному надходженні малих доз води безпосередньо в прикореневу зону, що

дозволяє здійснювати прецизійне регулювання обсягів вологозабезпечення відповідно до фізіологічних потреб фітоценозу. Рівномірність розподілу вологи запобігає перезволоженню субстрату, забезпечуючи оптимальну аерацію коренів протягом усього періоду вегетації. Морфологічно коренева система при такому способі поливу характеризується інтенсивнішим розвитком у зоні дії емітерів, що збільшує абсорбційну здатність рослини щодо води та нутрієнтів. Окрім того, відсутність зволоження листової поверхні мінімізує ризики фітопатологічних захворювань, а сухі міжряддя дозволяють безперешкодно виконувати агротехнічні заходи незалежно від циклу зрошення.

До основних переваг методу належать зниження витрат води у 2,5–3 рази порівняно з традиційними способами, збереження структури ґрунту через відсутність поверхневого стоку, а також можливість фертигації — поєднання поливу з внесенням добрив. Технологічна структура системи включає вузол водозабору, систему фільтрації для очищення від механічних та біологічних домішок, а також мережу трубопроводів, що складається з магістральних ліній та крапельних трубок з інтегрованими емітерами продуктивністю від 1 до 4 л/год.

Додатковим інструментом корекції мікроклімату є системи туманоутворення, які оптимізують гідротермічний режим у теплиці, знижуючи тепловий стрес і стимулюючи ріст розсади. У сучасній гідропоніці, зокрема при використанні інертних субстратів на основі мінеральної вати, крапельний полив є безальтернативним методом подачі живильних розчинів. На відміну від ґрунтових сумішей, гідропонні системи потребують суворого дотримання концентрації та кислотності робочого розчину, що реалізується за допомогою комп'ютеризованих систем керування.

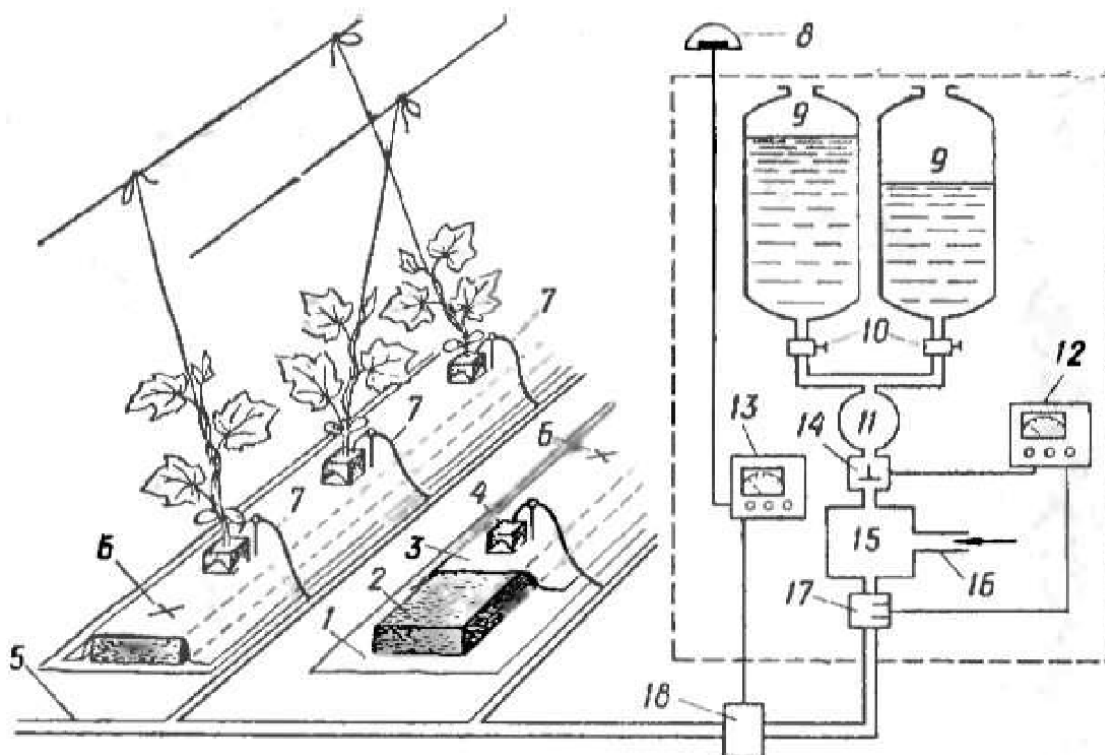


Рис. 1.2. Схема автоматичного регулювання концентрації живильного розчину:

1 - підкладкова плівка; 2 - мінераловатний мат із гродану; 3 - верхня світлопрозора та світловідбивна плівка; 4 - розсадний кубик із гродану з поживним середовищем; 5 - пластиковий трубопровід для поливу; 6 - хрестоподібний отвір у покривній плівці для встановлення розсадного кубика; 7 - крапельний емітер; 8 - сенсор надходження сонячної радіації; 9 - резервуари з концентрованими розчинами мінеральних добрив; 10 - запірний вентиль; 11 - насос; 12 - регулювальний концентрометр; 13 - інтегратор сонячного випромінювання; 14 - клапан регулювання подачі добрив; 15 - камера змішування; 16 - магістральний водогін; 17 - датчик концентрації розчину; 18 - регулятор витрати поливної води.

Процес переведення рослин із ґрунтового субстрату на гідрокультуру потребує поступової адаптації кореневої системи до живильного середовища. Протягом перших трьох діб після експозиції концентрація живильного розчину має становити 10%, після чого її поступово підвищують до рівня 20–25%. Протягом наступного триденного циклу застосовується 50% розчин, і лише після закінчення десяти-дванадцятиденного адаптаційного періоду рослини переводять на робочий розчин повної концентрації.

Дана методика іригації демонструє значні переваги порівняно з альтернативними способами, оскільки гарантує прецизійний та гомогенний

розподіл мінімальних об'ємів рідини по заданій площі. При цьому виключається безпосереднє зволоження вегетативної маси рослин та надмірна гідратація повітряного середовища культиваційної споруди. Структура комбінованої системи забезпечення параметрів вологості повітря та субстрату в теплиці базується на інтеграції декількох функціональних вузлів. Згідно з технологічною схемою, комплекс зданий синхронно підтримувати регламентовані показники вологості повітря за допомогою модуля туманоутворення та вологість субстрату шляхом крапельного зволоження.

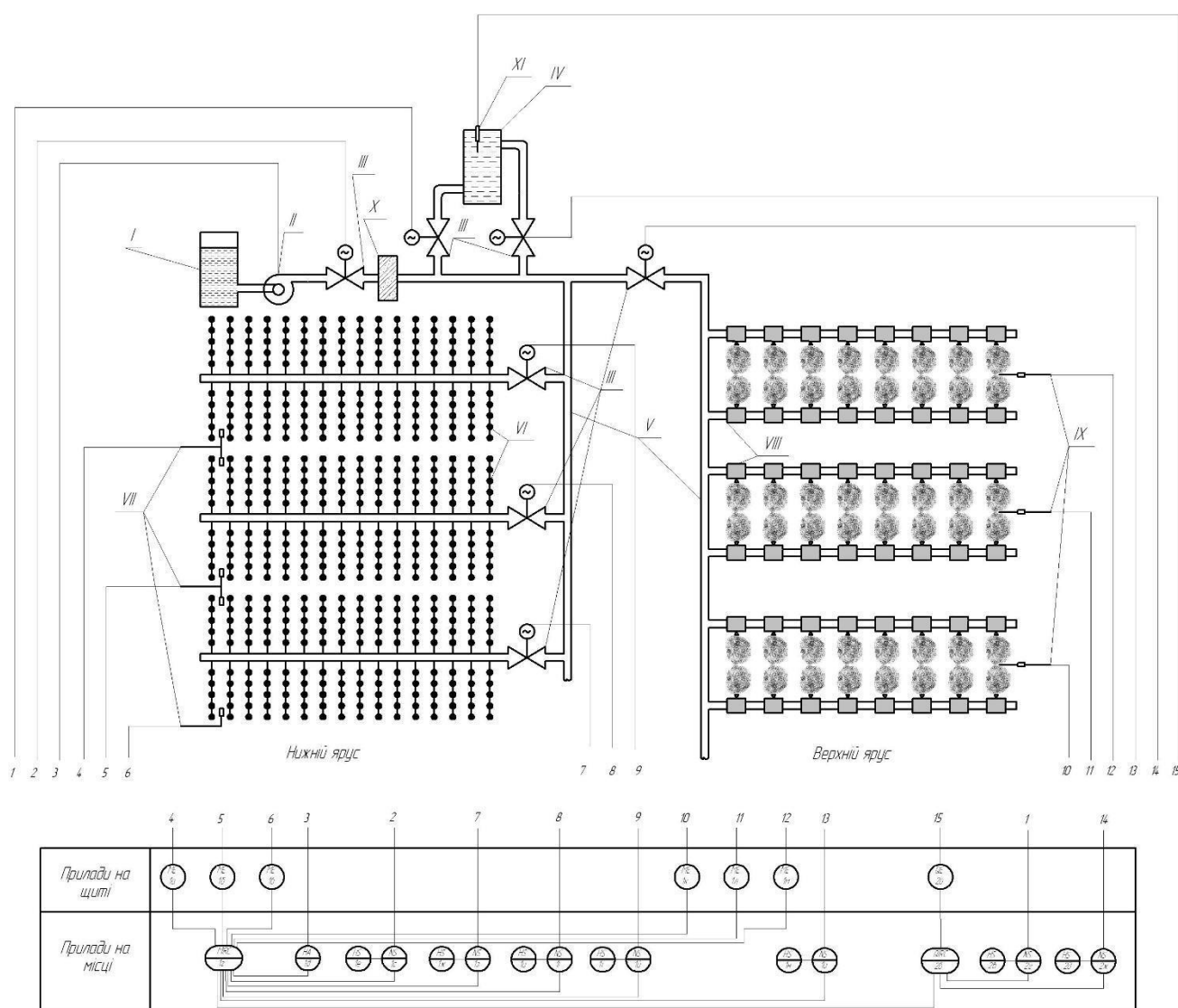


Рис. 1.3. Функціонально-технологічна схема комбінованої системи зволоження повітря та ґрунту в теплиці.

Транспортування робочої рідини з технологічного резервуара I здійснюється за допомогою насосної установки II, яка нагнітає воду в магістральний трубопровід теплиці. Регулювання інтенсивності подачі забезпечується запірно-регулювальним клапаном III, після чого потік спрямовується до блоку фільтрації X для очищення. Відповідно до поточної фази онтогенезу рослин та встановленого регламенту вирощування, до системи нижнього ярусу може здійснюватися дозоване підмішування живильного розчину з резервуара IV, при цьому контроль концентрації солей у потоці реалізується за допомогою датчика електропровідності XI. На основі аналізу даних про стан гідротермічного режиму, отриманих від сенсорів вологості повітря VII та субстрату IX, контролер ініціює відкриття електромагнітних клапанів відповідного ярусу. Нижній контур забезпечує розподіл вологи через мережу перфорованих трубок VI, тоді як верхній контур задіює систему форсунок VIII для дрібнодисперсного розпилення води в об'ємі споруди.

1.1.1. Живильні розчини для огірка.

Процес культивування огірка характеризується високою інтенсивністю споживання нутрієнтів, що зумовлено значними показниками врожайності, які досягають 30–35 кг на квадратний метр. Забезпечення рослин адекватною кількістю макро- та мікроелементів протягом усього вегетаційного циклу є критичною умовою формування продуктивності. Навіть короткочасний дефіцит елементів живлення в робочих розчинах призводить до інгібування ростових процесів, порушення онтогенезу та масової абсцизії зав'язей. Динаміка поглинання поживних речовин корелюється з етапами органогенезу. У фазі до появи першого справжнього листка спостерігається превалювання розвитку кореневої системи над вегетативною масою, що супроводжується закладанням генеративних органів. У цей період фізіологічна потреба рослин зміщується в бік фосфорного живлення при знижених нормах азоту та калію, з дотриманням співвідношення амонійної та нітратної форм азоту як один до трьох.

Етап активної експансії асиміляційної поверхні та перехід до фази цвітіння супроводжуються інтенсифікацією метаболізму. Одночасне формування плодів на нижніх ярусах та наростання вегетативних органів зумовлює підвищену потребу в азотно-калійному живленні. Рекомендована концентрація азоту в живильному середовищі в цей період становить 150–160 мг/л, при цьому вміст калію має перевищувати вміст азоту мінімум у півтора раза. Для оптимізації мінерального живлення в умовах гідропоніки доцільно використовувати нормативні показники складу розчинів, наведені у спеціалізованих таблицях.

Таблиця 1.2. Рекомендований склад живильного розчину для огірка

Показник	Мінімум	Оптимально	Максимум
N – NO ₃	120	160	200
N – NH ₄	-	7	20
P	30	40	50
K	190	230	270
Ca	120	140	300
Mg	15	20	60
S	25	35	60
Fe	0,4	0,6	2,0
Mn	0,3	0,6	1,0
In	0,1	0,3	1,0
B	0,1	0,2	0,5
Cu	0,02	0,03	0,04
Mo	0,03	0,05	0,08

У період плодоношення спостерігається максимальна інтенсифікація потреби в азотному та калійному живленні. Залежно від динаміки формування врожаю та рівня інсоляції, концентрація азоту в живильному середовищі має підтримуватися в діапазоні 180–190 мг/л. Структура азотного живлення передбачає комбіноване використання різних форм: 30–40 мг/л амонійного азоту (N-NH₄), 30 мг/л амідного (N-NH₂) та 120 мг/л нітратного (N-NO₃). Співвідношення макроелементів зміщується в бік калію, частка якого повинна перевищувати частку азоту в 1,7 раза, що є критично важливим при переважанні амонійних форм та в

Показник	Листя	Стебла	Плоди	Коріння
Сира маса	10,6	8,6	80,3	0,5
N	23,0	12,4	63,9	0,7
P	19,0	10,9	69,4	0,7
K	19,1	16,6	63,9	0,4
Ca	77,9	7,4	14,7	0,3
Mg	49,8	11,3	38,3	0,6

18

умовах недостатньої освітленості. Ефективна асиміляція різних форм азоту корелює зі специфічними пропорціями фосфору та калію в розчині.

Абсорбційна здатність рослин прямо залежить від показників врожайності: зростання продуктивності зумовлює інтенсивніше поглинання нутрієнтів. Основна частина біомаси та накопичених мінеральних речовин, зокрема азоту, фосфору та калію, зосереджена в плодах, які становлять 75–81 % сирої маси рослини. Натомість кальцій та магній локалізуються переважно в листковому апараті. Динаміка споживання поживних елементів в онтогенезі огірка є нерівномірною: до початку фази цвітіння рослина засвоює не більше 10 % від сумарного обсягу нутрієнтів, тоді як основний етап споживання припадає на фазу плодоношення. Швидкість метаболізму та абсорбції детермінується темпами росту фітоценозу та параметрами зовнішнього середовища.

Таблиця 1.3. Вміст поживних елементів в органах огірка, % (по Гейслеру Т.)

Середньодобове споживання нутрієнтів однією рослиною становить 0,2–0,3 г азоту та 0,3–0,4 г калію, тоді як абсорбція інших мінеральних елементів відбувається у значно менших обсягах. Шляхом прецизійного регулювання мінерального фону можливо керувати темпами онтогенетичного старіння культури. Зокрема, інкрементація частки нітратного азоту в живильних середовищах інгібує процеси фізіологічного старіння огірка. Натомість амонійні форми азоту стимулюють ранню віддачу врожаю, проте скорочують загальну тривалість репродуктивного періоду. З огляду на це, до фази плодоношення рекомендується підтримувати співвідношення амонійного та нітратного азоту на рівні 1 до 2–3, а з початком масового збору плодів — 1 до 3–4.

Надлишкова концентрація фосфору на завершальних етапах вегетації також виступає каталізатором старіння, що вимагає зниження вмісту цього елемента до

40–50 мг/л. Порушення балансу живлення, зокрема надлишок азоту, призводить до накопичення нітратів та нітритів у тканинах через уповільнення їх асиміляції в органічні сполуки. Хоча це не чинить деструктивного впливу на вегетативну масу, дієтична цінність плодів суттєво деградує через токсичність зазначених сполук для людини. Дотримання оптимальної пропорції азоту, фосфору та калію на рівні 1 до 0,5 до 1,8 дозволяє мінімізувати вміст нітратів до показників 10–12 мг/кг. Додаткове введення молібдену в розчин активізує фермент нітратредуктазу, що сприяє ефективному відновленню нітратів до аміаку. Застосування стратегії диференційованого живлення не лише підвищує продуктивність, а й прискорює початок плодоношення на 2–3 доби порівняно з використанням стабільних за складом розчинів.

Живильний розчин	Урожайність кг/м ²				Прибавка урожаю, %
	2010	2011	2012	середнє	
Стабільний склад	23,2	24,4	21,2	23,2	-
Диференційовани й склад	28,8	29,2	27,4	28,5	22,8

Результати біохімічного аналізу плодів підтверджують доцільність диференціації концентрації основних поживних елементів відповідно до етапів онтогенезу рослин. Встановлено, що плоди, культивовані із застосуванням живильних розчинів змінного складу, характеризуються ідентичними показниками вмісту води та сухої речовини порівняно з контрольними зразками. Водночас у досліджуваних об'єктах зафіксовано вищу концентрацію цукрів (1,96%) та аскорбінової кислоти (21,3 мг%), тоді як при використанні стабільних розчинів ці показники становлять 1,94% та 15,8 мг% відповідно.

1.1.2. Живильні розчини для томату.

Культура томата характеризується інтенсивнішим виносом мінеральних речовин на одиницю виробленої продукції порівняно з огірком. Усереднене співвідношення основних елементів живлення (азоту, фосфору та калію) становить 27,0:23,3:49,7. Оскільки близько 75% сирової маси припадає на плоди, саме в них

зосереджується понад 50% поглинених нутрієнтів, за винятком кальцію та магнію. Це зумовлює пікове споживання поживних речовин саме у фазі плодоношення. На початкових етапах онтогенезу томат потребує посиленого фосфорного фону за помірного вмісту азоту та калію (120–130 мг/л та 240–260 мг/л відповідно), при цьому частка нітратного азоту має втричі перевищувати амонійну форму.

Активізація ростових процесів, масове цвітіння та формування зав'язей супроводжуються зростанням потреби в азотно-калійному живленні, оскільки рослина одночасно нарощує вегетативну масу та формує плоди на нижніх китицях. У цей період концентрацію азоту підвищують до 150–160 мг/л, а калію — до 300–320 мг/л. Для запобігання передчасному припиненню вегетації під час плодоношення рівень азоту доводять до 170–180 мг/л. Важливо контролювати баланс між азотом і калієм: надлишок азоту на старті вегетації провокує надмірне розростання зеленої маси, що затримує дозрівання плодів та знижує імунітет рослин. До моменту зав'язування плодів на перших 3–4 китицях оптимальне співвідношення азоту до калію становить 1:2, а з початком масового плодоношення воно коригується до 1:1,6–1,7.

Високий рівень калійного живлення позитивно корелює з накопиченням органічних кислот, покращенням органолептичних властивостей та рівномірністю пігментації плодів. Разом із інтенсифікацією споживання азоту та калію зростає роль фосфору, вміст якого має бути не меншим за 80 мг/л, особливо в періоди наливу плодів. Томат також демонструє високу чутливість до забезпечення магнієм та кальцієм, які необхідні як для синтезу органічних сполук, так і для підтримання функціонального стану кореневої системи. Співвідношення кальцію до магнію повинно відповідати пропорції 1:4. У фазі активного росту концентрація магнію має становити 50 мг/л, а кальцію — 200 мг/л, з подальшим збільшенням до 60 мг/л та 240 мг/л відповідно в період наливу плодів. Диференційований підхід до складання живильних розчинів залежно від фази розвитку рослин є ключовим фактором високої продуктивності культури.

Таблиця 1.5. Поживних речовин у живильному розчині

Живильні речовини	Стадія росту				
	Після посадки до дозрівання перших плодів	До дозрівання плодів на другий кисті	До дозрівання плодів на третій кисті	До дозрівання плодів на четвертій кисті	Від дозрівання плодів на п'ятій кисті і до завершення вегетації
	Вміст поживних речовин в розчині. Міліграмів на літр				
<i>N</i>	70	80	100	120	150
<i>P</i>	50	50	50	50	50
<i>K</i>	120	120	150	150	200
<i>Ca</i>	150	150	150	150	150
<i>Mg</i>	40	40	40	50	50
<i>S</i>	50	50	50	60	60
<i>Fe</i>	2,8	2,8	2,8	2,8	2,8
<i>Cu</i>	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2
<i>Mn</i>	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8
<i>Zn</i>	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3
<i>B</i>	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7
<i>Mo</i>	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05

Ефективність абсорбції нутрієнтів рослинними організмами детермінується сукупністю екзогенних факторів, серед яких домінуюче значення має інтенсивність інсоляції. У зв'язку з цим, при культивуванні томата в осінньо-зимовий період за умов дефіциту природного освітлення, рецептура живильних розчинів потребує адаптації до поточних світлових умов. Корекція концентрацій базових макроелементів — азоту, фосфору, калію, кальцію та магнію — повинна супроводжуватися оптимізацією співвідношення амонійної та нітратної форм азоту залежно від етапу органогенезу та рівня сонячної радіації.

На початкових стадіях вегетації за умови високої інтенсивності освітлення, характерної для липня та серпня, допускається інтеграція значних доз амонійного азоту при співвідношенні $N-NH_4$ до $N-NO_3$ як 1 до 2. Протягом вересня та жовтня

вказана пропорція має бути скоригована до рівня 1 до 3 або вище. У період з листопада по грудень амонійні форми азоту підлягають повному виключенню зі складу розчину, оскільки при низькій інтенсивності асиміляції та дефіциті вуглеводів надмірна акумуляція аміаку в тканинах може спричинити фізіологічну інтоксикацію рослин. Для нівелювання цих ризиків в осінньо-зимовий сезон доцільно збільшувати питому вагу нітратного азоту та калію. Якщо після висадки розсади співвідношення азоту до калію варіюється в межах 1 до 1,2–1,5, то у фазі плодоношення воно зміщується до 1 до 2,5, а на фінальних етапах — до 1 до 3 і більше, що зумовлено підвищеною потребою фітоценозу в калії за умов недостатньої освітленості.

Впровадження стратегії диференційованого живлення забезпечує зростання продуктивності томата на 20–23 % порівняно з використанням поживних середовищ статичного складу. Результати досліджень підтверджують позитивний вплив варіативного мінерального фону не лише на загальну врожайність, а й на біохімічні показники якості плодів у зимово-весняних циклах вирощування.

Живильний розчин	Середня врожайність за три роки, кг з 1 м ² корисної площі	Вміст сухої речовини, %	Сума цукрі, %	Вітамін С, мг %	Кислотність, %
Стабільний склад	25,5	6,44	1,84	14,5	0,87
Диференційований склад	31,4	7,14	1,94	18,0	0,52

1.2. Вимоги до систем автоматичного регулювання вологості ґрунту в теплиці.

Проектування систем автоматизації технологічних процесів у спорудах закритого ґрунту регламентується чинними нормативно-інструктивними

матеріалами. Для тепличних блоків площею до 3 га обсяг автоматизації визначається технічним завданням на проектування з урахуванням функціонального призначення, потужності, конструктивних особливостей, інженерної інфраструктури та результатів техніко-економічного обґрунтування.

Відповідно до положень ОНТП-СХ. 10-85, у тепличних комплексах цілорічної експлуатації передбачено впровадження таких функцій:

- Автоматичне регулювання: підтримання температурного режиму повітря на заданому рівні (у циклах «день/ніч») з урахуванням рівня інсоляції або за часовою програмою; стабілізація відносної вологості повітря.
- Програмне управління: функціонування систем тепло- та світлозахисних екранів, поливу, підживлення рослин діоксидом вуглецю CO₂ та систем додаткового опромінення.
- Контроль та моніторинг: дистанційне вимірювання метеорологічних чинників зовнішнього середовища (температури, параметрів вітрового навантаження, інтенсивності сонячної радіації); автоматична сигналізація при досягненні граничних відхилень температури, а також контроль стану виконавчих механізмів (електромагнітних клапанів, циркуляційних насосів).

Параметри точності регулювання згідно з галузевими нормами становлять:

- Температура повітря: точність регулювання — ± 2 °C, контролю — ± 1 °C.
- Температура теплоносія систем обігріву ґрунту: діапазон 30 ... 50 °C з похибкою не більше ± 2 °C.
- Температура поливної води та відносна вологість повітря: допустимі відхилення становлять ± 2 °C та ± 5 % відповідно.

- Динаміка температурних переходів: швидкість зміни режиму «день – ніч» встановлена на рівні 5 °С з кроком 0,5 ... 1 °С/год.

Технічне забезпечення системи включає первинні перетворювачі питомої провідності серії АСМ-Z, оснащені електродами з корозійностійкої сталі та інтегрованим термічним сенсором. Робочий діапазон вимірювань становить 0,5 ... 5000 мкСм/см.

Виконавчим механізмом у контурі дозування мінеральних добрив виступає насосний агрегат типу F404PP-41/НС-1000. Конструкція пристрою передбачає використання електродвигуна з системою самовентиляції та оребреним циліндричним корпусом для ефективного тепловідводу. Насосна частина представлена робочим колесом відкритого типу, консольно закріпленим на валу двигуна. Принцип дії базується на створенні відцентрової сили, що забезпечує всмоктування робочого розчину через центральний патрубок та його подальше транспортування у змішувальну камеру через випускний патрубок.

Таблиця 1.7. Технічні характеристики насоса :

Назва параметра	Значення
Напір, м	5
Маса , кг	5
Електродвигун	4А80Ф6А3
Частота обертання ел. двигуна, хв ⁻¹	950
Параметри електричного живлення :	
Напруга , В	220
Частота, Гц	50
Встановлена потужність , кВт	0.6-0.7
Габаритні розміри , мм	350x200x200
Глибина занурення, мм	1000
Максимальна в'язкість, мПа·с	800

Рівень інсоляції, що досягає земної поверхні, детермінується сукупністю географічних та метеорологічних чинників, зокрема регіональним розташуванням

об'єкта, часовим інтервалом доби та ступенем хмарності. Верифікація фактичних значень сонячної радіації є критично важливою умовою для реалізації стратегії програмованої врожайності агрокультур. Для прецизійного вимірювання сумарної радіації, що надходить із верхньої півсфери небосхилу, використовується датчик моделі SR9502. Цей пристрій конструктивно реалізований як напівпровідниковий фотоприймач, що забезпечує формування уніфікованого вихідного сигналу в діапазоні 4–20 мА, що спрощує його інтеграцію в промислові системи автоматизації. Технічні параметри зазначеного сенсора систематизовані у відповідних специфікаціях.

Таблиця 1.8 Технічні характеристики датчика SR9502

Калібрування:	по робочому еталону, градуйованому по сонцю
Діапазон вимірювання:	від 0 Вт/м ² до 1300 Вт/м ²
Спектральний діапазон:	від 0,4 мкм до 1,1 мкм
Стабільність:	зміна крутизни перетворення не більше 2%
Чутливий елемент:	високо-стабільний кремнієвий фотоприймач
Конструкція:	алюмінієвий корпус з полімерним покриттям і напівсферичним екраном зі скла
Габаритний розмір:	d = 160 мм, h = 65 мм

Для забезпечення точного дозування мінеральних добрив у процесі приготування живильного розчину застосовуються соленоїдні клапани. У складі даної системи інтегровано двоходові клапани серії VZ2 (тип з'єднання — різьбове) з номінальним тиском PN, технічні характеристики яких систематизовано в таблиці 1.9.

Таблиця 1.9 Технічні характеристики клапана VZ2

Номінальний діаметр, мм	15
Номінальний тиск, Бар	16

Пропускна характеристика	рівнопроцентна
Робочий хід плунжера, мм	15
Умовна пропускна здатність $K_{V_{max}}$, м ³ /год	0,2
Допустимий перепад тиску, Бар	3,5±0,1
Робоче середовище	вода, суміш
Температура робочого середовища, °C	від +2 до +120

Конструкційні елементи проточної частини виконані з поліпропілену, що гарантує стабільне транспортування концентрованих розчинів без формування відкладень на внутрішніх поверхнях. Хімічна інертність матеріалу запобігає небажаним реакціям із робочим середовищем, забезпечуючи незмінність заданої концентрації розчинів. Для захисту насосного обладнання від механічних домішок на вході інтегровано фільтр грубої очистки. Процеси регулювання потоку, гомогенізації та дозування мінеральних добрив реалізуються на базі восьмибітного мікроконтролера Atmel ATMEGA168A-PU. Архітектура обчислювального пристрою базується на гарвардській моделі з RISC-системою команд та регістровим файлом із 32 восьмибітних регістрів. На даному етапі в системі реалізовано пропорційний закон регулювання, якому притаманна наявність статичної похибки, що унеможливорює точну стабілізацію регульованої величини на заданому рівні. Враховуючи змінний сольовий склад вихідної води та необхідність прецизійної підготовки добрив, П-регулятор не забезпечує необхідної технологічної точності, що зумовлює доцільність переходу до алгоритму ПІД-регулювання для плавного та точного дозування поживних розчинів.

1.3. Мета та задачі автоматизації технологічного процесу.

Метою даної бакалаврської роботи є проектування комп'ютерно-інтегрованої системи для комплексної автоматизації виробничих циклів у рослинництві. Робота

базується на впровадженні сучасних мікропроцесорних засобів та інноваційних технологій, що спрямовані на оптимізацію ресурсів і забезпечення високої якості продукції при зниженні її собівартості. Основними завданнями дослідження є:

- розробка комп'ютерно-інтегрованої системи прецизійного регулювання вологості повітряного середовища та субстрату в умовах теплиці;
- аналіз динамічних характеристик об'єкта автоматизації та виведення його передавальної функції;
- обґрунтування вибору вимірювальних елементів, регулювальних органів і виконавчих механізмів із подальшим математичним описом їхніх ланок;
- проєктування функціональної та структурної моделей системи автоматичного керування (САК) параметрами вологості;
- розробка принципової електричної схеми САК та проведення техніко-економічного розрахунку вартості проєкту.

З огляду на моральну та фізичну застарілість наявного обладнання, робота передбачає модернізацію системи управління концентрацією живильного розчину. Модернізація включає перехід від пропорційного (П) закону регулювання до пропорційно-інтегрально-диференціального (ПІД), заміну первинних вимірювальних перетворювачів, а також оновлення силової апаратури, зокрема магнітних пускачів, автоматичних вимикачів та засобів захисту, на сучасні комутаційні пристрої підвищеної надійності.

РОЗДІЛ 2. РОЗРОБКА КОМП'ЮТЕРНО-ІНТЕГРОВАНОЇ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ ТЕХНОЛОГІЧНИМ ПРОЦЕСОМ

2.1. Аналіз динаміки та визначення передатної функції об'єкта.

Основним дестабілізуючим фактором, що впливає на тепломасообмінні процеси в культивацийних спорудах під час температурних піків, виступає інтенсивність сонячної інсоляції. Період термічного перевантаження повітря в теплицях охоплює від 25 % до 40 % загального експлуатаційного часу залежно від географічного розташування. Гіпертермія призводить до пригнічення інтенсивності транспірації вологи листовим апаратом, що створює ризики незворотного в'янення рослин.

Ефективним методом термічної корекції та одночасного підвищення відносної вологості повітряного середовища є адіабатичне зволоження припливних або циркуляційних потоків у системах вентиляції. Для реалізації централізованого зволоження застосовуються касетні або плівкові випаровувачі, поверхні яких піддаються безперервному зрошенню. У процесі проходження повітря крізь зрошувачу насадку відбувається тепломасообмін між газовою фазою та рідкою поверхнею. Повітряний потік віддає явну теплоту на фазовий перехід води, що супроводжується його суттєвим охолодженням при одночасному зростанні вологовмісту. Це сприяє стабілізації водного балансу фітоценозу та зниженню температури рослинних тканин. Процеси термодинамічної взаємодії на межі розділу фаз протікають при умовній константі ентальпії повітря, що дозволяє описати систему через диференціальні рівняння теплового та матеріального балансу для апаратів із розвиненою поверхнею контакту F .

$$m_v \cdot c_p \cdot \frac{dt}{d\tau} = G_v \cdot c_p \cdot (t_1 - t) - r \cdot \beta \cdot F \cdot (d''(t) - d) \cdot \rho_v \cdot 10^{-3} \quad (2.1)$$

$$m_v \cdot \frac{dd}{d\tau} = G_v \cdot (d_1 - d) + \rho_v \cdot \beta \cdot F \cdot (d''(t) - d) \quad (2.2)$$

$$d''(t) = a \cdot t + b \quad (2.3)$$

Під час виведення системи рівнянь було прийнято наступні допущення та спрощення:

- зволожувач повітря ідентифікується як проточний апарат ідеального змішування;
- рушійними силами процесів тепло- та масообміну є середньоарифметичні різниці відповідних температурних показників;
- градієнтом температур за висотою (уздовж робочої поверхні) нехтується;
- ефект акумуляції теплової енергії в конструктивних елементах установки не враховується.

Отже, наведені математичні залежності описують часову динаміку зміни температури та вологовмісту повітряного потоку на виході з кондиціонера.

В рівняннях (2.1) і (2.2) позначено: t - температура повітря на виході зволожувача, ($^{\circ}\text{C}$); d - вологовміст повітря на виході зволожувача, ($\text{г}/\text{кг.с.п.}$); t_1 , d_1 - температура і вологовміст повітря на вході в камеру зволожувача (температура і вологовміст шатра теплиці на момент включення зволожувача), ($^{\circ}\text{C}$, $\text{г}/\text{кг.с.п.}$); $d''(t)$ - вологовміст повітря в приграничному шарі водяної плівки при температурі повітря, ($\text{г}/\text{кг.с.п.}$); ρ_v - густина повітря, ($\text{кг}/\text{м}^3$); F - поверхня випаровування, (м^2); β - коефіцієнт випаровування, ($\text{м}/\text{с}$); r - питома теплота випаровування, ($\text{Дж}/\text{кг}$); G_v - витрати повітря, ($\text{кг}/\text{с}$); m_v - маса повітря в об'ємі камери зволожувача, (кг); c_p - питома теплоємність повітря, ($\text{Дж}/\text{кг} \cdot ^{\circ}\text{C}$).

Перепишемо рівняння (2.1) і (2.2) з новими позначеннями сталих величин:

$$\begin{cases} m_v \cdot c_p \cdot \frac{dt}{d\tau} = -a_1 \cdot t + b_1 \cdot d + c_1 \\ m_v \cdot \frac{dd}{d\tau} = a_2 \cdot t - b_2 \cdot d + c_2 \end{cases} \quad (2.4)$$

де $a_1 = G_v \cdot c_p + r \cdot \beta \cdot F \cdot \rho_v \cdot a$; $b_1 = r \cdot \beta \cdot F \cdot \rho_v - r \cdot \beta \cdot F \cdot \rho_v \cdot b$; $c_1 = G_v \cdot c_p \cdot t_1 + r \cdot \beta \cdot F \cdot \rho_v \cdot c$;

$a_2 = \beta \cdot F \cdot \rho_v \cdot a$; $b_2 = G_v + \beta \cdot F \cdot \rho_v - \beta \cdot F \cdot \rho_v \cdot b$; $c_2 = G_v \cdot d_1 + \beta \cdot F \cdot \rho_v \cdot c$

Розв'язуючи систему (2.4) відносно $t(\tau)$ і $d(\tau)$ отримаємо нові рівняння:

$$A \cdot \frac{d^2 t}{d\tau^2} + B \cdot \frac{dt}{d\tau} + C \cdot t = D_1 \quad (2.5)$$

$$A \cdot \frac{d^2 d}{d\tau^2} + B \cdot \frac{dd}{d\tau} + C \cdot d = D_2 \quad (2.6)$$

де $A = T_1 \cdot T_2$; $B = T_1 \cdot \frac{b_2}{a_2} + T_2 \cdot \frac{b_1}{a_1}$; $C = \frac{a_1 \cdot b_2}{a_2 \cdot b_1} - 1$; $D_1 = \frac{c_2}{a_2} + \frac{b_2 \cdot c_1}{a_2 \cdot b_1}$; $D_2 = \frac{c_1}{b_1} + \frac{a_1 \cdot c_2}{b_1 \cdot a_2}$;

$T_1 = \frac{m_v \cdot c_p}{b_1}$; $T_2 = \frac{m_v}{a_2}$

Розв'язок диференціальних рівнянь (2.5) і (2.6) за початкових умов: $\tau = 0$,

$t = t_0 = t_1$, $\frac{dt}{d\tau} = 0$, $d = d_0 = d_1$, $\frac{dd}{d\tau} = 0$ отримаємо у вигляді:

$$t(\tau) = \frac{t_0 \cdot C - D_1}{C \cdot (r_1 - r_2)} \cdot (r_1 \cdot e^{r_1 \tau} - r_2 \cdot e^{r_1 \tau}) + \frac{D_1}{C} \quad (2.7)$$

$$d(\tau) = \frac{d_0 \cdot C - D_2}{C \cdot (r_1 - r_2)} \cdot (r_1 \cdot e^{r_1 \tau} - r_2 \cdot e^{r_1 \tau}) + \frac{D_2}{C} \quad (2.8)$$

$$\text{де } r_{1,2} = \frac{-B \pm \sqrt{B^2 - 4 \cdot A \cdot C}}{2 \cdot A}$$

Співвідношення (2.7) та (2.8) відображають динаміку трансформації температурних $t(\tau)$ показників і вологовмісту $d(\tau)$ повітряного потоку на виході з камери зволоження. Розрахунок відносної вологості повітря здійснюється на основі відомої аналітичної залежності:

$$\varphi(\tau) = \frac{10^5 \cdot d(\tau)}{622 \cdot P'_n(t)} \quad (2.9)$$

$$P'_n(t) = (0.04 \cdot t^2 - 0.25 \cdot t + 7) \cdot 133.3 \quad (2.10)$$

На основі розв'язку рівняння (2.10) можлива побудова розгінної характеристики об'єкта керування, графічна інтерпретація якої наведена на рис. 2.1.

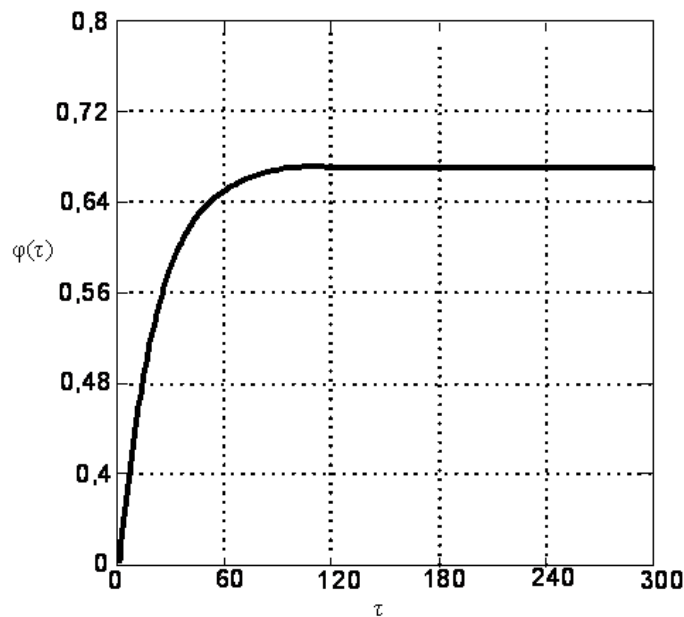


Рис 2.1. Розгінна характеристика об'єкта управління.
(залежність відносної вологості в теплиці від часу)

Параметри витрати води G_w визначаються на основі значень масової швидкості водяної плівки, що формується на зрошувальній поверхні F :

$$G_w = w_w \cdot \rho_w \cdot F \quad (2.11)$$

де w_w - швидкість руху водяної плівки, (м/с); ρ_w - густина води, (кг/м^3).

Звідки поверхня зволоження становить:

$$F = \frac{G_w}{w_w \cdot \rho_w} \quad (2.12)$$

Для розрахунку значень нормованої розгінної характеристики використовується наступна аналітична залежність:

$$\Theta_{ni} = \frac{\Theta_i - \Theta_0}{\Theta_m - \Theta_0} \quad (2.13)$$

де Θ_i - поточне значення вологості, Θ_0 - початкове значення вологості, Θ_m - усталене значення вологості.

Для побудови нормованої розгінної характеристики об'єкта керування було використано емпіричні дані, систематизовані в таблиці 2.1.

Таблиця 2.1. Дані для нормованої розгінної характеристики.

Час регулювання, (t, с)	Значення відносної вологості (φ)	Нормоване значення відносної вологості, (φ_{ni})
0	0,43	0
5	0,45	0,083333
10	0,48	0,208333
15	0,52	0,375
20	0,56	0,541667
25	0,59	0,666667
30	0,61	0,75
35	0,64	0,875

40	0,65	0,916667
45	0,655	0,9375
50	0,66	0,958333
55	0,665	0,979167
60	0,668	0,991667
65	0,669	0,995833
70	0,67	1
75	0,67	1

На основі даних, наведених у таблиці 2.1, побудовано нормовану розгінну характеристику об'єкта, графічне представлення якої відображено на рис. 2.2.

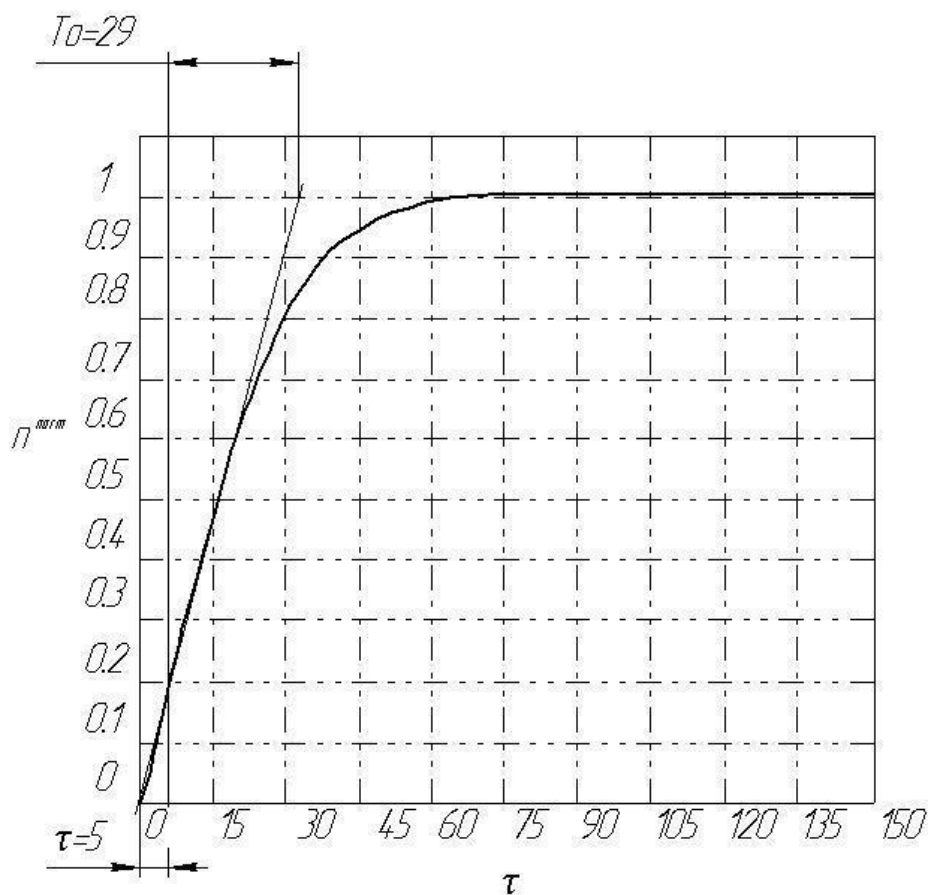


Рис.2.2. Розгінна характеристика по каналу керування вологістю.

Методом побудови дотичної до нормованої розгінної характеристики було визначено наступні динамічні параметри об'єкта: $T = 29\text{с}$, $\tau = 5\text{с}$.

Визначення коефіцієнта передачі об'єкта здійснюється на підставі аналізу пропорційної залежності між варіацією положення регулювального органу та результуючим відхиленням відносної вологості середовища (рис. 2.3).

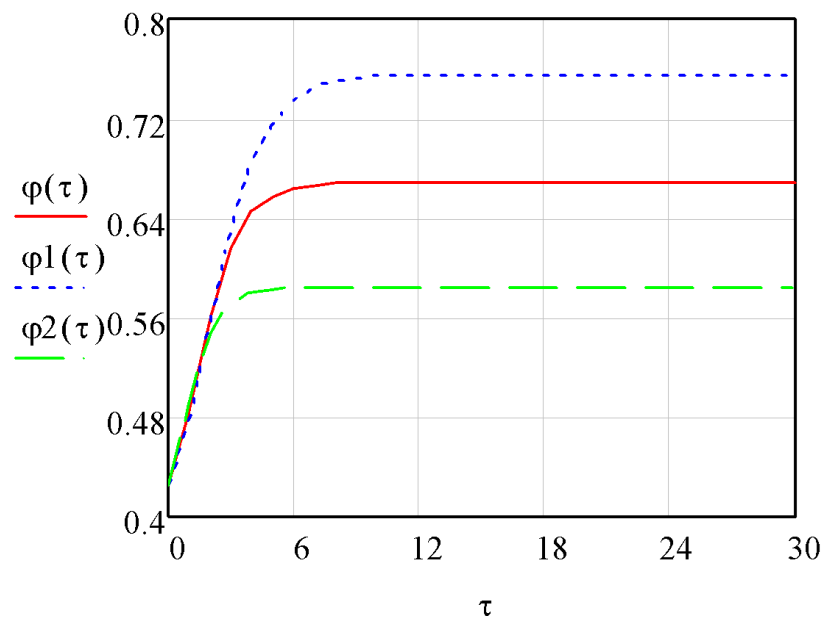


Рис. 2.3. Залежність зміни відносної вологості при різній подачі води в трубі.

$$1- G_v = 18 \text{ кг/с}, 2- G_v = 12 \text{ кг/с}, 3- G_v = 19 \text{ кг/с}$$

Коефіцієнт передачі об'єкта визначається по формулі

$$k = \frac{\Delta y(\infty)}{\Delta x} \quad (2.14)$$

Звідки $k = 0.2$

Передаточна функція по каналу керування відносною вологістю:

$$W(s) = \frac{0.2 \cdot e^{5 \cdot s}}{29 \cdot T + 1}$$

2.2. Вибір сприймаючого елемента системи керування.

До вимірювальних перетворювачів зазвичай висувається низка нормативних вимог:

- лінійність та однозначність статичної характеристики з допустимим відхиленням у межах 0,1–3 %;
- високий рівень чутливості та часова стабільність метрологічних параметрів;

- мінімальна інерційність (швидкодія);
- хімічна резистентність до впливу контрольованого та навколишнього середовища, що забезпечується використанням захисних оболонок;
- мінімізація зворотного впливу на вимірюваний параметр, а також ергономічність монтажу й експлуатації.

Процедура вибору вимірювальних перетворювачів для контуру регулювання реалізується у два етапи. На першій стадії визначається тип перетворювача відповідно до природи контрольованої величини та умов функціонування об'єкта. На другій стадії проводиться ідентифікація конкретного типорозміру за каталожними даними. Рекомендується обирати датчик таким чином, щоб його межі вимірювання максимально корелювали з діапазоном зміни контрольованого параметра, враховуючи при цьому перевантажувальну здатність та сумісність з електронною апаратурою. Особлива увага приділяється динамічним властивостям пристрою, зокрема його постійній часу.

Для поточної системи автоматичного керування (САК) обрано датчик вологості Honeywell ННН-3610. Конструктивно він являє собою багатошарову структуру, що складається з чергування полімеру та губчастої пластини, нанесених на кремнієву підкладку з інтегрованими схемами підсилення та нормалізації сигналу. Дана серія представлена в різних виконаннях: безкорпусному, у металевому корпусі з терморезистором або з пілозахисним фільтром. Експлуатаційний температурний діапазон становить від -40 до +85 °С при відносній вологості до 100 % (за умови відсутності конденсації). Ключовими перевагами приладу є висока прецизійність, компактні габарити, енергоефективність та широка область вимірювання. Наявність нормалізованого вихідного сигналу суттєво спрощує інтеграцію датчика в систему.

Також розглянуто датчик температури та вологості DHT11, призначений для моніторингу параметрів газоподібних і рідких середовищ. Пристрій характеризується діапазоном вимірювання температур від -50 до +200 °С для класів допуску «В» і «С». Номінальна статична характеристика перетворення відповідає

типу 100M, а граничні значення основної похибки детерміновані вимогами чинних стандартів (ДСТУ-6651-94) для класу допуску А.



Рис. 2.4. Зовнішній вигляд датчика температури та вологості DHT-11.

Передаточна функція датчика:
$$W_D(s) = \frac{0.1}{30 \cdot s + 1}$$

З огляду на необхідність контролю гідротермічних показників не лише в атмосфері теплиці, а й безпосередньо в кореневій зоні, доцільним є впровадження датчика 10HS (рис. 2.5).

Технічні можливості датчика 10HS дозволяють визначати об'ємну частку вологи у значному об'ємі ґрунтового зразка (1 л). Робоча частота пристрою 70 МГц мінімізує вплив мінералізації та текстури субстрату на результати досліджень, забезпечуючи високу прецизійність вимірювань для широкого спектра типів ґрунтів.

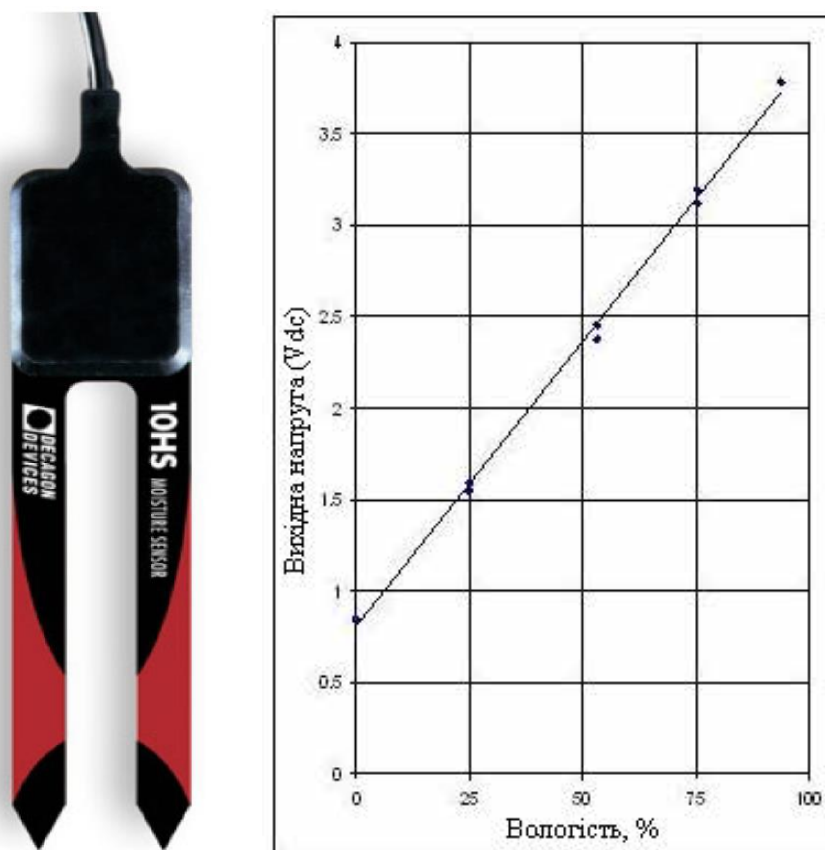


Рис. 2.5. Зовнішній вигляд і статична характеристика датчика 10HS.

Таблиця 2.2. Характеристика датчика вологості ґрунту 10HS.

Тип	Градуювання	Діапазон вимірювання %	Показник інерційності	Живлення	Діапазон температур
10HS	0.01 В	0...60	0,1с.	Від 3В 12мА до 15В 15мА	0 – 50 °С

Передаточна функція даного датчика:
$$W_d(s) = \frac{0.01}{0.1 \cdot s + 1}$$

Оскільки в системі передбачено одночасне функціонування двох типів сенсорів, їхня результуюча математична модель формується шляхом паралельного з'єднання відповідних передавальних функцій:

$$W_{CE}(s) = \frac{0.1}{30 \cdot s + 1} + \frac{0.01}{0.1 \cdot s + 1} = \frac{0.31 \cdot s + 0.11}{30.1 \cdot s + 2} \quad (2.15)$$

2.3. Вибір регулюючого органу та виконавчого механізму системи керування.

Регулювальний орган є критично важливим компонентом системи автоматичного керування (САК), оскільки він здійснює прямий вплив на об'єкт керування. Рівень його працездатності безпосередньо визначає експлуатаційну надійність та точність підтримки заданих параметрів усієї системи.

Функціональні можливості будь-якого регулювального органу визначаються трьома базовими характеристиками:

- Пропускна здатність: кількісний показник середовища, що проходить через пристрій.
- Пропускна (внутрішня) характеристика: функціональна залежність між величиною відкриття клапана та його здатністю пропускати потік за умови стабільного тиску.
- Витратна характеристика: реальна динаміка зміни витрати речовини залежно від ходу затвора в робочому режимі.

Вибір оптимальної моделі регулювального органу для заданих технічних умов здійснюється наступним чином:

$$P_1 = 15 \frac{\text{кг}}{\text{см}^3} \quad y = 1 \frac{\text{с}}{\text{см}^3} \quad v = 0.2 \text{с}$$

$$\Delta P = P_1 - P_3 = 10 \frac{\text{кг}}{\text{см}^2} \quad \Delta P_n = P_2 - P_3 = 4 \frac{\text{кг}}{\text{см}^2} \quad \Delta Q_{\min} = 106.7 \frac{\text{м}^3}{\text{год}} \quad (2.16)$$

$$\varphi_{\min} = 65\%, \quad \varphi_{\max} = 75\%$$

$$Q_{\max} = \varphi_{\max} / K_0 \quad \text{де} \quad K_0 = 0.15 \quad (2.17)$$

$$Q_{\max} = \varphi_{\max} / K_0 = 75 / 0.15 = 500 \left(\frac{\text{м}^3}{\text{год}} \right)$$

$$Q_{\min} = \varphi_{\min} / K_0 = 65 / 0.15 = 433 \left(\frac{\text{м}^3}{\text{год}} \right)$$

Визначаємо максимальну пропускну здатність:

$$Kv_{\max} = Q_{\max} \cdot \sqrt{\frac{y}{\Delta P_c - \Delta P_n}} \quad (2.18)$$

де y - об'ємна маса рідини, ΔP_c - перепад тисків в системі, $\Delta P_c = 10 \text{ кг/см}^2$

ΔP_n - перепад тисків на лінії, $\Delta P_n = 4$

$$Kv_{\max} = 500 \cdot \sqrt{\frac{1}{10 - 4}} = 204 \frac{\text{м}^3}{\text{год}}$$

Вибираємо регулюючий орган (клапан) з умовним діаметром $d = 125 \text{ мм}$, і

пропускну здатністю $Kv_{PO} = 245 \frac{\text{м}^3}{\text{год}}$ (при умові $Kv_{PO} \geq 1.2 Kv_{\max} = 1.2 \cdot 204 = 244.8$)

Визначаємо робочий відрізок витратної характеристики регулюючого органу. Для цього обчислюємо пропускну здатність трубопровідної лінії:

$$Kv_{\text{л}} = Q_{\max} \cdot \sqrt{\frac{y}{\Delta P_{\text{л. max}}}} = 500 \cdot \sqrt{\frac{1}{4}} = 250 \frac{\text{м}^3}{\text{год}} \quad (2.19)$$

Визначаємо співвідношення пропускну здатності РО на лінії:

$$n = \frac{Kv_{PO}}{Kv_{\text{л}}} = \frac{245}{250} = 0.98 \approx 1 \quad (2.20)$$

Перепад тиску на РО:

$$\Delta P_{\text{рег}} = \frac{\Delta P}{1 + n^2} = \frac{10}{1 + 0.98^2} = 5 \frac{\text{кг}}{\text{см}^2} \quad (2.21)$$

Витрата регульованого середовища через регулюючий орган:

$$Q_{рег} = Kv_{PO} \cdot \sqrt{\frac{\Delta P_{PO}}{y}} = 245 \cdot \sqrt{\frac{5}{1}} = 548 \frac{м^3}{год} \quad (2.22)$$

Максимальна і мінімальна відносна витрати:

$$\mu_{max} = \frac{Q_{max}}{Q_{PO}} = \frac{500}{548} = 0.9 \quad \mu_{min} = \frac{Q_{min}}{Q_{PO}} = \frac{433}{548} = 0.8 \quad (2.23)$$

Із довідкових даних обираємо витратну характеристику виконавчого органу

$$l_{max} = 0.81 \quad l_{min} = 0.6$$

На основі довідкових матеріалів встановлюємо відношення перепаду тиску на регулювальному органі (РО) до загального перепаду тиску в системі. Згідно з розрахунками, цей коефіцієнт варіюється в межах від $\beta_{max} = 0.8$ до $\beta_{min} = 0.64$. Зазначений діапазон значень відповідає наступним показникам перепадів тиску безпосередньо на виконавчому пристрої:

$$\Delta P_{max} = \beta_{max} \cdot \Delta P = 0.81 \cdot 10 = 8.1 \frac{кг}{см^2} = 8.1 \cdot 10^{-4} \frac{кг}{м^2} \quad (2.24)$$

$$\Delta P_{min} = \beta_{min} \cdot \Delta P = 0.64 \cdot 10 = 6.4 \frac{кг}{см^2} = 6.4 \cdot 10^{-4} \frac{кг}{м^2} \quad (2.25)$$

Розрахункове обґрунтування характеристик регулювального органу дозволяє отримати вихідні параметри для коректного підбору виконавчого механізму. У системах непрямого регулювання виконавчий механізм безпосередньо взаємодіє з регулювальним пристроєм об'єкта керування. Шляхом переміщення робочого елемента за командами, що генеруються обчислювальним блоком, цей механізм реалізує цілеспрямований керуючий вплив на об'єкт. У галузі автоматизації технологічних процесів для маніпулювання потоками середовищ домінують дросельні органи, функціонування яких ґрунтується на варіації гідравлічного опору через зміну площі прохідного перерізу. Електричні приводи підбираються з

урахуванням необхідного крутного моменту, що має протидіяти динамічним зусиллям робочого тіла.

$$M_p = 0.07 \cdot \Delta P \cdot d^3 = 0.07 \cdot 8.1 \cdot 10^{-4} \cdot 65^3 \cdot (10^{-3})^3 = 1.6 \text{ Н} \cdot \text{м} \quad M_{BM} = 2 \cdot M_p = 1.6 \cdot 2 = 3.2 \text{ Н} \cdot \text{м}$$

Отже обираємо електричний ВМ (рис.2.6.), виходячи з умови $M_{\Pi} > M_{BM}$



Рис. 2.6. Зовнішній вигляд електричного ВМ типу ПР-1М.

Електричний ВМ типу ПР-1М з такими характеристиками:

- номінальний момент на валу $M_H = 9,8 \text{ Н} \cdot \text{м}$
- пусковий момент $M_{\Pi} = 29,4 \text{ Н} \cdot \text{м}$
- час одного вихідного валу $T_{BM} = 10 \text{ с}$
- максимальний кут повороту вихідного вала $\alpha = 180^\circ$

Електричні виконавчі механізми, що розглядаються як функціональні вузли регулятора, де вхідним сигналом є напруга керування U_{BM} , а вихідною величиною — кут повороту вихідного вала φ_{BM} , за своїми динамічними характеристиками належать до інтегруючих ланок із наступною передавальною функцією:

$$W_{\text{вм}}(s) = \frac{k_{\text{вм}}}{s} = \frac{1}{T_{\text{вм}} \cdot s} \quad (2.26)$$

Це обумовлено тим, що для електродвигуна, інтегрованого у структуру такого типу виконавчих механізмів, виконується наступна аналітична залежність:

$$n = k_{\partial} \cdot U_{\text{вм}} \quad (2.27)$$

Враховуючи те, що $n = \frac{d\varphi_{\text{рот}}}{dt}$ де $\varphi_{\text{рот}}$ - кут повороту ротора двигуна

$$\frac{d\varphi_{\text{вм}}}{dt} = k_{\text{ред}} \cdot k_{\partial} \cdot U_{\text{вм}} = k_{\text{вм}} \cdot U_{\text{вм}}$$

де $\varphi_{\text{вм}}$ - вихідний сигнал ВМ пропорційний $\varphi_{\text{рот}}$, де передаточний коефіцієнт пропорційності дорівнює передатному відношенню редуктора $k_{\text{ред}}$, який перетворює $\varphi_{\text{рот}}$ в $\varphi_{\text{вм}}$.

З урахуванням наведених вище розрахунків та технічних параметрів електродвигуна, передавальна функція виконавчого механізму набуває такого вигляду:

$$W_{\text{вм}}(s) = \frac{0,3}{10 \cdot s}$$

2.4. Вибір закону управління.

Аналіз динамічних властивостей об'єкта керування на стадії проєктування дозволяє обґрунтовано обрати оптимальний алгоритм управління. Для цього

використовується критерій відношення часу запізнення τ до сталої часу T об'єкта:

- При $\tau/T < 0,2$: доцільним є застосування лінійного, позиційного або імпульсного законів регулювання.
- При $0,2 \leq \tau/T \leq 1$: рекомендується обирати лінійний або імпульсний закон регулювання.
- При $\tau/T > 1$: оптимальним рішенням є впровадження імпульсного алгоритму керування.

При ідентифікації параметрів необхідно враховувати, що структура отриманої передавальної функції повинна бути адекватною раніше описаній математичній моделі. Оскільки для досліджуваного об'єкта виконуються наступні умови:

$$\frac{\tau}{T} = \frac{5}{29} = 0,17 \quad (2.28)$$

Оскільки отримане значення параметра не перевищує 0,2, достатнім є впровадження позиційного закону регулювання. Однак, враховуючи вимоги до технічної реалізації системи автоматичного керування, доцільно обрати регулятор безперервної дії, зокрема пропорційний (П) регулятор.

У пропорційному регуляторі встановлюється пряма залежність між керівним впливом на регульовальний орган та величиною неузгодження (відхиленням вихідного сигналу об'єкта від заданої норми): $x_{p.o.} = k_p \cdot \Delta y$, де $x_{k.o.}$ – керуюча дія на регулюючий орган; k_p – коефіцієнт передачі регулятора; Δy – відхилення регулюємого параметра. Аналіз наведеного рівняння свідчить про те, що стан рівноваги регулятора може бути досягнутий при різних значеннях регульованого параметра.

$$W_{\Pi}(s) = k_p \quad (2.29)$$

Для обчислення оптимальних параметрів настроювання регуляторів застосовується формульний метод, який ґрунтується на наближеній оцінці значень параметрів налаштування для типових процесів регулювання.

Для П – регулятора:

$$k_p = \frac{0.3}{K_{об} \cdot (\tau_{об} / T_{об})} = \frac{0.3}{0.00199 \cdot 0.17} = 37,67 \quad (2.30)$$

5. Функціонально-структурна та структурно-алгоритмічна схеми системи керування.

Під функціонально-структурною схемою САК розуміють графічну модель, що відображає сукупність функціональних ланок системи та послідовність взаємодії між ними (рис. 2.7).

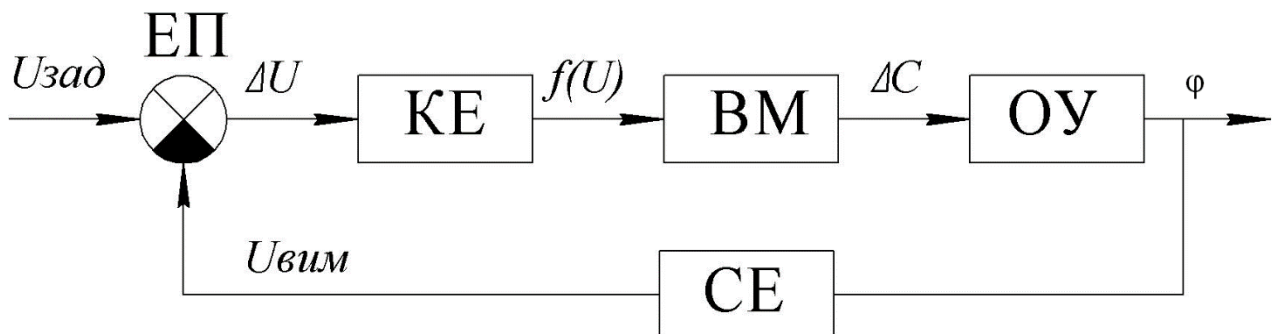


Рис. 2.7. Функціонально-структурна схема САК.

Функціонально-структурна архітектура системи автоматичного керування (САК) базується на взаємодії низки ключових компонентів: сприймаючих елементів (датчиків вологості моделей НІН-3610 та 10HS), виконавчого механізму (електричного привода типу ПР-1М, що керує заслінкою), а також керуючого і порівнювального блоків, реалізованих на базі мікроконтролера PIC16. Об'єктом керування в даній системі виступає тепличний комплекс. Схема відображає не лише функціональні блоки, а й фізичні величини, що циркулюють між ними.

Процес регулювання ініціюється фіксацією поточного рівня вологості ϕ , який за допомогою датчиків трансформується у вимірювальну напругу $U_{\text{вим}}$. У мікропроцесорному модулі відбувається порівняння цього значення із заданим еталоном $U_{\text{зад}}$, внаслідок чого обчислюється сигнал неузгодженості ΔU . Ця різниця через схему керування формує напругу живлення виконавчого двигуна $f(U)$, що спричиняє механічне зміщення заслінки та коригує витрату води C у системі зволоження. На основі аналізу динамічних властивостей системи визначено відповідні передавальні функції для кожного елементарного вузла.

Об'єкт управління:

$$W_{OY}(s) = \frac{k_0}{T_0 \cdot s + 1} \cdot e^{-\tau \cdot s} = \frac{0.2}{29 \cdot T + 1} \cdot e^{5 \cdot s} \quad (2.31)$$

Передаточна функція керуючого елемента (П-регулятора):

$$W_K(s) = 37.67 \quad (2.32)$$

Передатна функція датчика:

$$W_{CE}(s) = \frac{0.31 \cdot s + 0.11}{30.1 \cdot s + 2} \quad (2.33)$$

Виконавчого механізму:

$$W_{PO}(s) = \frac{0.3}{10 \cdot s} \quad (2.34)$$

Структурно-алгоритмічна модель системи автоматичного керування (САК) є графічною інтерпретацією динамічних характеристик її функціональних вузлів, що формує математичну базу процесу управління. Дана схема візуалізує компонентний склад системи у вигляді типових динамічних ланок та визначає топологію їхнього взаємозв'язку.

Процес побудови структурно-алгоритмічної схеми базується на функціональній схемі та розрахованих передавальних функціях кожного елемента. Графічно компоненти системи представляються у формі прямокутних блоків, а напрямки передачі інформаційних або енергетичних сигналів позначаються лініями зі стрілками. Внутрішній простір кожного блоку містить відповідну передавальну функцію, що математично описує перетворення вхідного сигналу у вихідний.

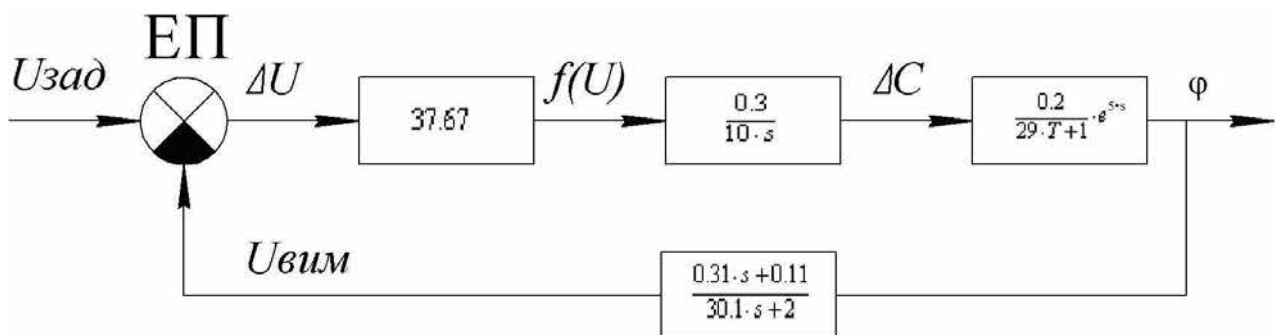


Рис. 2.8. Структурно-алгоритмічна схема САК

2.6. Дослідження якості та стійкості роботи системи.

Передавальна функція розімкненої системи автоматичного регулювання концентрації вологості в теплиці має такий вигляд:

$$W_{\text{роз}}(s) = W_{KE}(s) \cdot W_{BM}(s) \cdot W_{об}(s) \quad (2.35)$$

Для дослідження динамічних характеристик системи в середовищі MATLAB Simulink було розроблено імітаційну модель, загальний вигляд якої наведено на рис. 2.9.

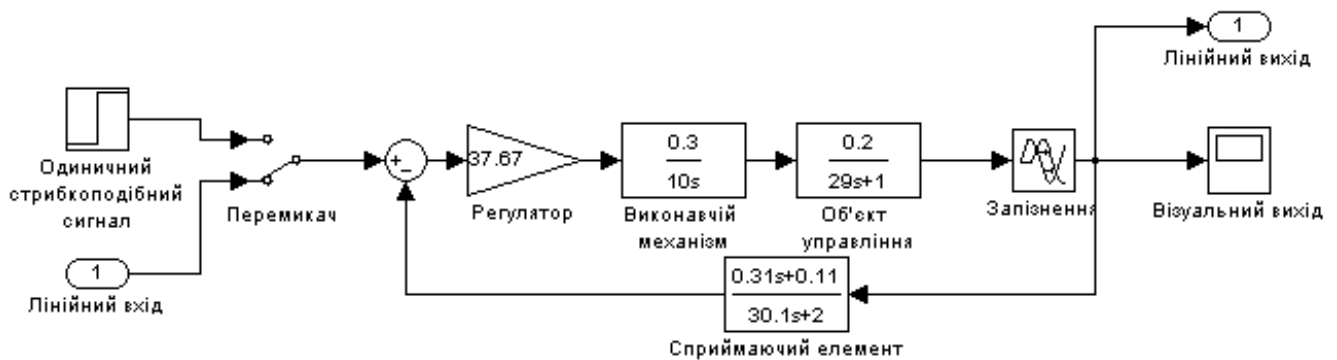


Рис. 2.9. Модель системи автоматичного регулювання вологості в теплиці в середовищі MATLAB Simulink.

Амплітудно-фазова частотна характеристика (АФЧХ) є ефективним способом візуалізації частотного відгуку лінійної стаціонарної динамічної системи у форматі графіка в комплексній площині. У цій моделі частота розглядається як параметр кривої, тоді як фазовий зсув та амплітуда системи для конкретних частот відображаються через кут і довжину радіус-вектора відповідних точок годографа. Таке представлення дає змогу інтегрувати амплітудно-частотну та фазо-частотну характеристики на єдиній площині, що є критично важливим для аналізу динамічних систем, зокрема для оцінки їхньої стійкості та розрахунку запасів стійкості.

Для генерації АФЧХ у середовищі MATLAB проводиться лінеаризація досліджуваної моделі з наступним поданням сигналу на вхід та його зняттям із виходу системи. Візуалізація характеристики здійснюється шляхом побудови годографа Найквіста. Відповідно до критерію Найквіста, розроблена система класифікується як стійка, оскільки її АФЧХ не охоплює критичну точку з координатами $(-1; j0)$. Запас стійкості за модулем при цьому ідентифікується як дистанція від точки перетину характеристики розімкнутого контуру з від'ємною дійсною піввіссю до зазначеної точки $(-1; j0)$.

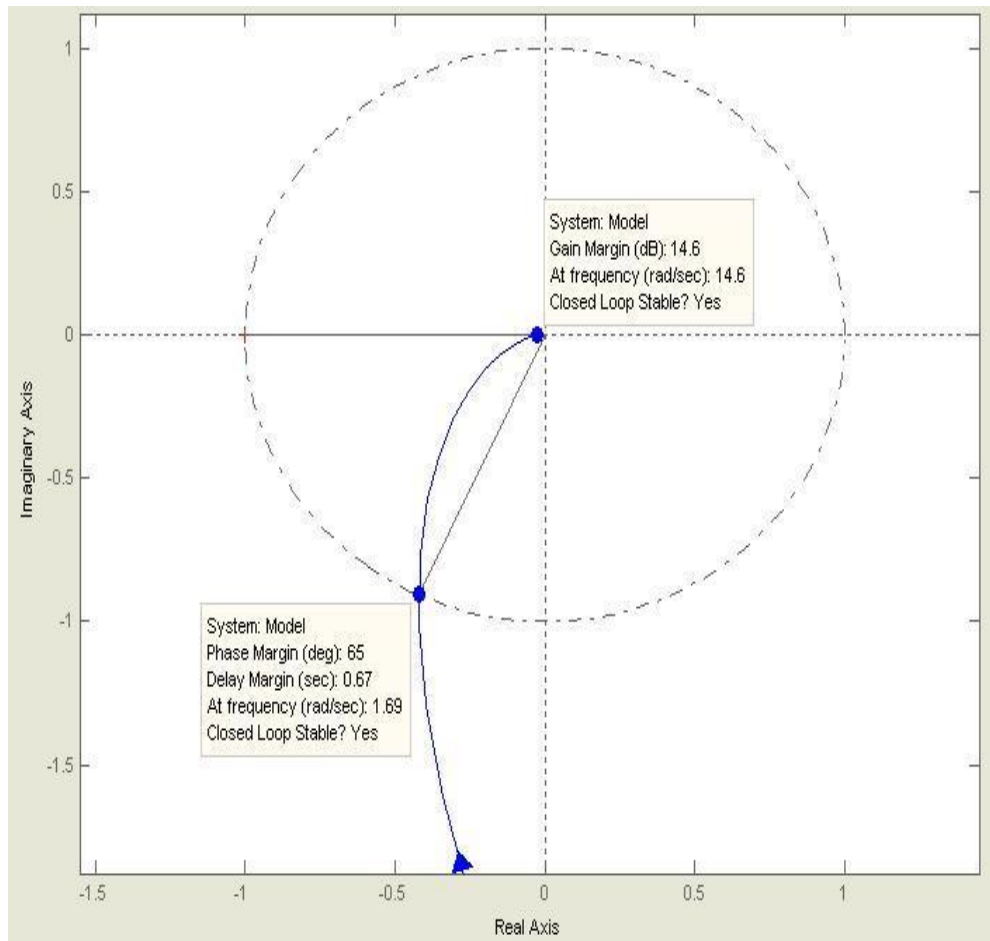


Рис. 2.10. АФЧХ системи.

Запас стійкості по модулю складає:

$$\Delta L = 14.6 \text{ дБ} \quad (2.36)$$

Запас стійкості по фазі детермінується величиною кута, що утворюється між від'ємною частиною дійсної осі та радіус-вектором, проведеним із початку координат до точки перетину АФЧХ розімкнутої системи з колом одиничного радіуса. Цей параметр характеризує фазовий зсув, який система може витримати без втрати стійкості. Згідно з критерієм Найквіста, для забезпечення динамічної якості керування необхідно, щоб система мала достатні запаси як за модулем, так і за фазою, що гарантує надійне функціонування об'єкта при відхиленнях параметрів ланок від номінальних значень.

$$\Delta \varphi = 65^\circ \quad (2.37)$$

Здійснимо моделювання перехідного процесу для розімкнutoї системи автоматичного керування (САК). Перехідний процес у САК являє собою часову динаміку зміни вихідного параметра системи у відповідь на подачу на її вхід збурення у формі одиничного ступеневого впливу:

$$l(t) = \begin{cases} 1 & \text{при } t \geq 0 \\ 0 & \text{при } t < 0 \end{cases}. \quad (2.38)$$

При цьому передбачається, що в початковий момент часу $t = 0$ система перебувала у стані спокою з нульовими початковими умовами. Шляхом подачі на вхід моделі одиничного ступеневого сигналу за умови функціонування регулятора, ми отримуємо часову характеристику перехідного процесу замкнутої системи.

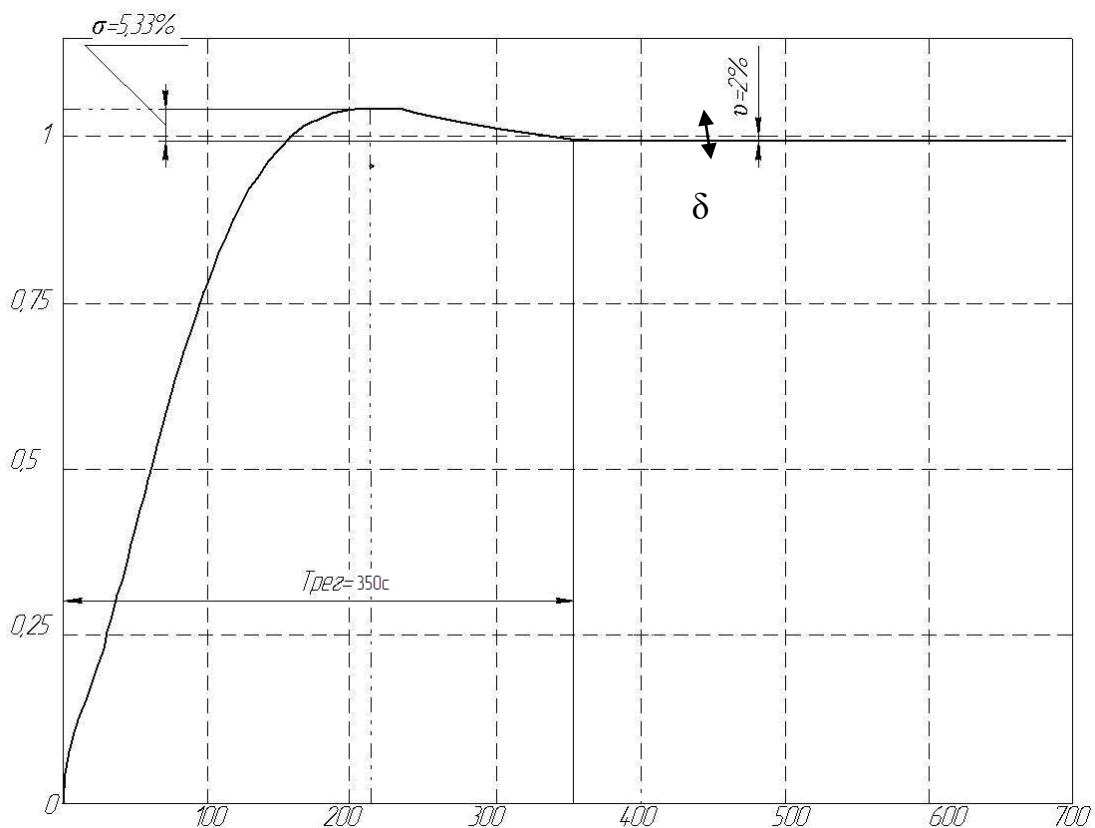


Рис. 2.11. Перехідний процес системи керування.

Аналіз отриманих результатів свідчить, що впровадження регулятора забезпечує поліпшення показників якості функціонування системи, зокрема призводить до скорочення часу регулювання.

Показники якості роботи скоригованої САК визначаються такими параметрами:

1. Точність САК в усталеному режимі (статична похибка): $\delta = 2$.
2. Швидкодія системи, що визначається тривалістю перехідного процесу (часом регулювання): $t_p = 350$ с, що відповідає встановленим технологічним вимогам.
3. Максимальне відхилення вихідної величини під час перехідного процесу (перерегулювання):

$$\sigma = \frac{h_{\max} - h_{\text{зад}}}{h_{\text{зад}}} \cdot 100\% = 5.33\% \quad (2.39)$$

4. Плавність перехідного процесу, що визначається кількістю коливань вихідної величини протягом часу t_p , а саме показником коливальності $n = 1$.

Отже, розраховані показники якості функціонування системи повністю відповідають встановленим технологічним вимогам.

2.7. Вибір контролера.

Для системи автоматичного регулювання вологості субстрату в якості керуючого елемента обрано контролер Arduino Mega 2560 (рис. 2.12).

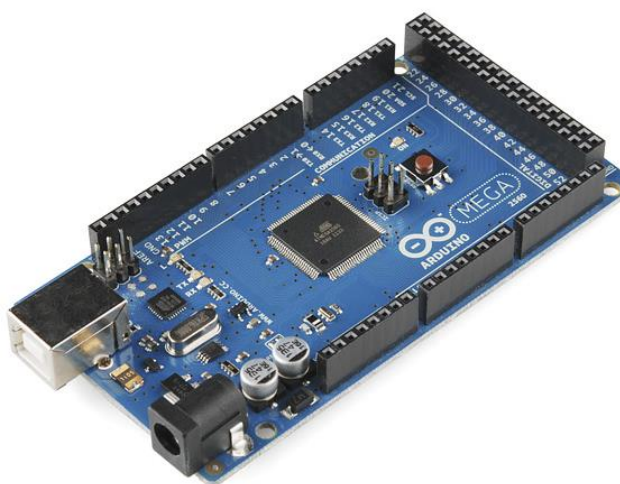


Рис. 2.12. Панель контролера Arduino mega 2560.

Алгоритм терморегуляції припливного повітря базується на цільових значеннях, що встановлюються користувачем під час програмування пристрою. Процес нагріву здійснюється шляхом передачі теплової енергії від теплоносія, що циркулює крізь калорифер. Мікроконтролер Arduino Mega 2560, порівнюючи поточні показники з уставкою, через вихідні релейні модулі коригує ступінь відкриття клапана, регулюючи подачу теплоносія. Важливим етапом розробки програмно-апаратного комплексу є обґрунтування періоду квантування. Мінімізація кроку квантування сприяє підвищенню прецизійності цифрового управління, проте спричиняє надмірне обчислювальне навантаження на процесор. Натомість надмірне збільшення інтервалу призводить до втрати інформативності сигналу та унеможливорює коректну реконструкцію вихідних даних на основі дискретних вибірок. Якщо спектр вхідного сигналу обмежений верхньою частотою $f_{\max}$, то його адекватне відображення забезпечується за умови вимірювання значень через часові проміжки:

$$T \leq \frac{\pi}{w_c} \quad (2.40)$$

Оскільки амплітуди високочастотних складових суттєво ослаблені, при заданій точності відтворення сигналу його можна вважати спектрально обмеженим. Гранична частота спектра визначається за наступною залежністю:

$$|W_{зам.н.ч}(j\omega)| \leq \theta_{зад} \quad (2.41)$$

де $|W_{зам.н.ч}(j\omega)|$ - амплітудно-частотна характеристика неперервної частини замкненої автоматичної системи; $\theta_{зад}$ - необхідна точність, яка повинна бути забезпечена на виході системи.

Відповідно до структурно-алгоритмічної схеми САК (рис. 2.7), безперервна частина системи включає всі функціональні елементи за виключенням керуючого пристрою. Для обчислення передавальної функції безперервної частини розімкненої системи та спрощення подальших розрахунків, ланку запізнення об'єкта керування замінено еквівалентною залежністю:

$$W_{oy}(s) = \frac{0.2}{29 \cdot s + 1} \cdot e^{-5 \cdot s} = \frac{0.2}{29 \cdot s + 1} \cdot \frac{s^2 - 0.24 \cdot s + 0.48}{s^2 + 0.24 \cdot s + 0.48}$$

$$W_{oy}(s) = \frac{0.2 \cdot s^2 - 0.048 \cdot s + 0.096}{29 \cdot s^3 + 7.8 \cdot s^2 + 14.16 \cdot s + 0.48} \quad (2.42)$$

Розімкнена система:

$$W_{роз.н.ч}(s) = \frac{0.3}{10 \cdot s} \cdot \frac{0.31 \cdot s + 0.11}{30.1 \cdot s + 2} \cdot \frac{0.2 \cdot s^2 - 0.048 \cdot s + 0.096}{29 \cdot s^3 + 7.8 \cdot s^2 + 14.16 \cdot s + 0.48}$$

$$W_{роз.н.ч}(s) = \frac{0.0186 \cdot s^3 + 0.002136 \cdot s^2 + 0.007344 \cdot s + 0.003168}{872.9 \cdot s^5 + 2927.8 \cdot s^4 + 4418.16 \cdot s^3 + 427.68 \cdot s^2 + 9.6 \cdot s}$$

Замкнена система:

$$W_{зам.н.ч}(s) = \frac{W_{роз.н.ч}(s)}{1 + W_{роз.н.ч}(s)}$$

$$W_{\text{зам.н.ч}}(s) = \frac{(0.0186 \cdot s^3 + 0.002136 \cdot s^2 + 0.007344 \cdot s + 0.003168)}{(0.0186 \cdot s^3 + 0.002136 \cdot s^2 + 0.007344 \cdot s + 0.003168) \cdot (872.9 \cdot s^5 + 2927.8 \cdot s^4 + 4418.16 \cdot s^3 + 427.68 \cdot s^2 + 9.6 \cdot s)}$$

Замінивши $W_{\text{зам.н.ч}}(s)$ на $W_{\text{зам.н.ч}}(j \cdot w)$ та обрахувавши результат по формулі:

$$A = \sqrt{\text{Re}^2 + \text{Im}^2} \quad (2.43)$$

отримаємо (формула 2.43):

$$A(w) = \sqrt{\frac{(-0.002136 \cdot w^2 + 0.003168)^2 + (0.0186 \cdot w^3 + 0.007344 \cdot w)^2}{(-0.002136 \cdot w^2 + 0.003168)^2 + (0.0186 \cdot w^3 + 0.007344 \cdot w)^2 + (-2927.8 \cdot w^4 - 427.68 \cdot w^2)^2 + (872.9 \cdot w^5 + 4418.16 \cdot w^3 + 9.6 \cdot w)^2}}$$

Вводимо отримане рівняння для пошуку відповіді в програму Matcad приймаючи точність 0,01.

$$\sqrt{\frac{(-0.002136 \cdot w^2 + 0.003168)^2 + (0.0186 \cdot w^3 + 0.007344 \cdot w)^2}{(-0.002136 \cdot w^2 + 0.003168)^2 + (0.0186 \cdot w^3 + 0.007344 \cdot w)^2 + (-2927.8 \cdot w^4 - 427.68 \cdot w^2)^2 + (872.9 \cdot w^5 + 4418.16 \cdot w^3 + 9.6 \cdot w)^2}}$$

$$\text{Find}(w) = 0.173$$

$$T_{\text{ww}} := \frac{3.14}{0.173} = 18.15$$

Отже оптимальний час квантування – 18,15 с.

2.8. Розробка програмного забезпечення системи управління температурним режимом.

Забезпечення цільових параметрів технологічного циклу потребує чіткого визначення діапазонів температурних коливань, систематизації отриманих показників та оцінки допустимих меж корекції термічного режиму. Для розробки програмного забезпечення контролера Arduino Mega 2560 застосовується інтегроване середовище розробки Arduino IDE версії 1.6.8 та мова програмування C++. Функціональна логіка системи деталізована в додатку А. Згідно з розробленим алгоритмом, програма ініціює перевірку стану порту і, за умови його доступності, здійснює трансляцію даних із сенсора до COM-порту. Програмна реалізація починається з інтеграції спеціалізованої бібліотеки для датчика DHT11, що забезпечує коректну взаємодію сенсора з апаратною частиною контролера. Структурна організація моніторингу температурних показників відображена на відповідній блок-діаграмі.

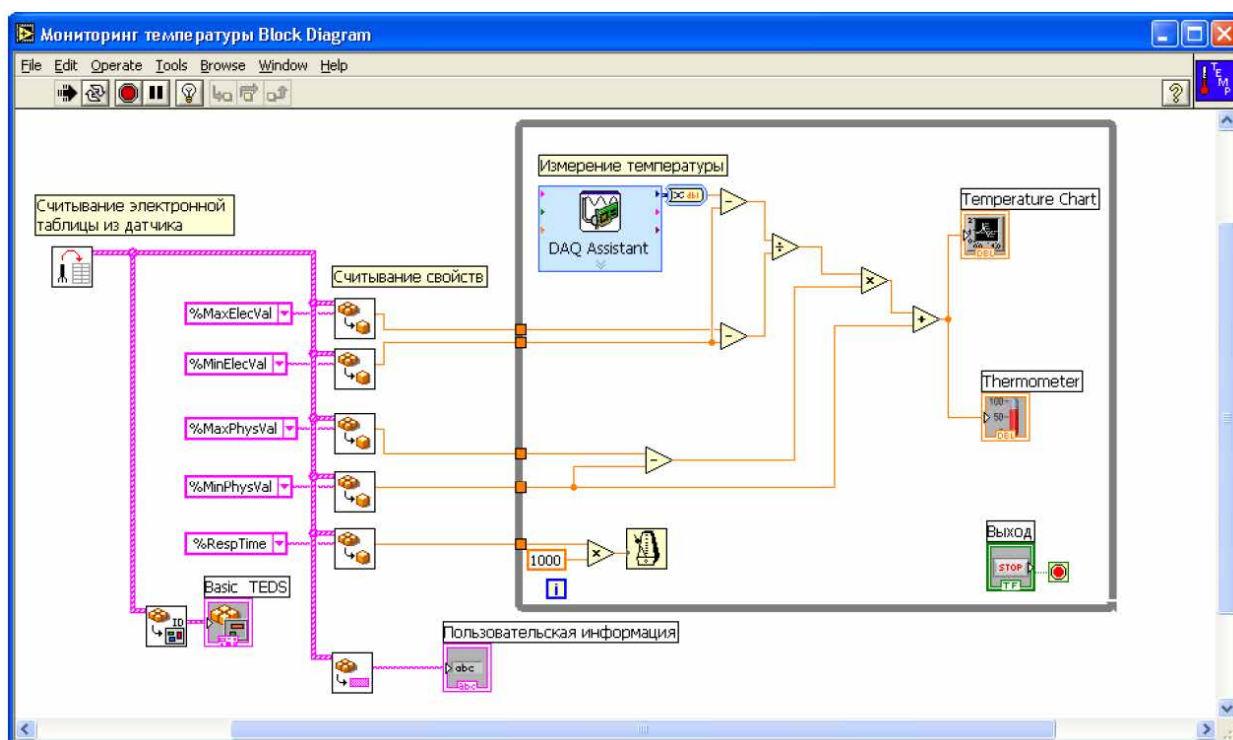


Рис. 2.13. Блок-діаграма системи моніторингу температури.

На рис. 2.14. Інтерфейс панелі системи моніторингу вологості субстрату.

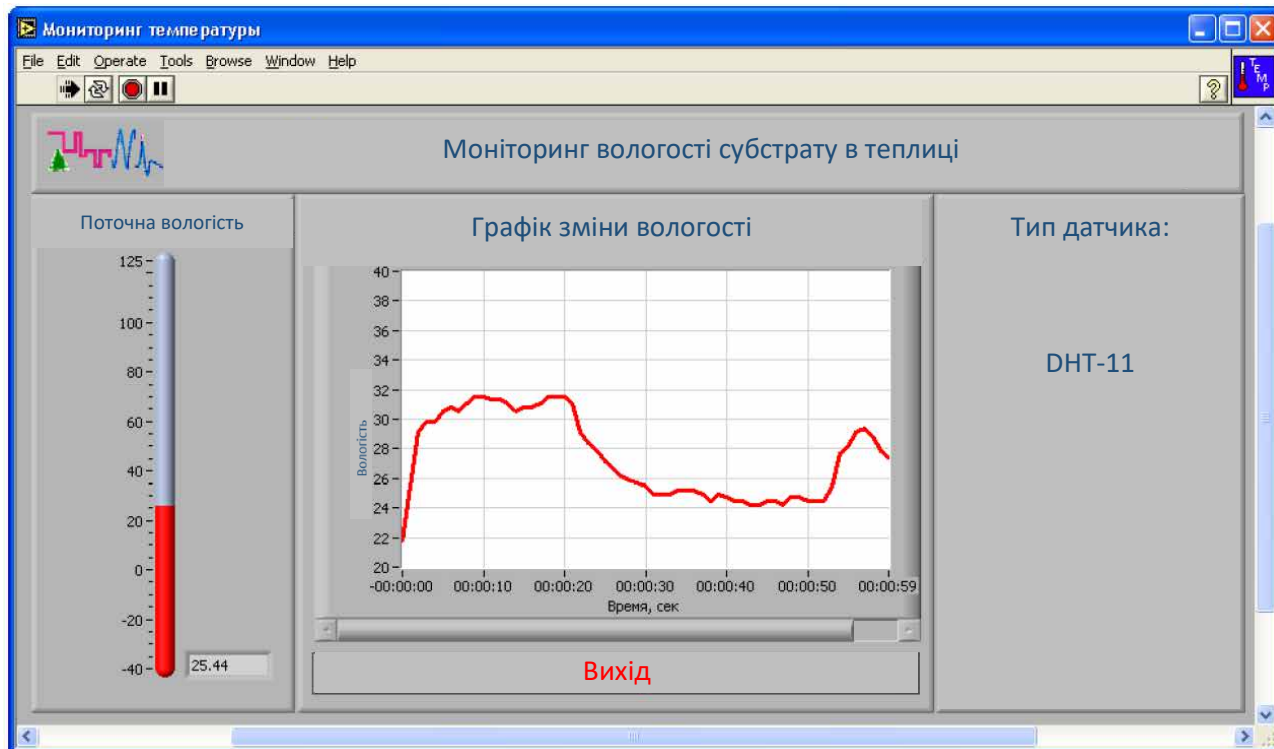


Рис. 2.14. Інтерфейс панелі системи моніторингу температур.

Активація програмного інтерфейсу ініціює виведення головної форми, на якій візуалізовано територіальний план ПАТ «Комбінат Тепличний» із маркуванням теплиць та відповідних секторів. У правій частині робочого простору розташована інтерактивна панель управління інформаційними потоками. Для забезпечення цілісності даних у режимі перегляду реалізовано розмежування прав доступу, що обмежує несанкціоноване редагування. Авторизований користувач має можливість здійснювати повний цикл операцій із базою даних: перегляд архівних записів, додавання нових відомостей, модифікацію або видалення неактуальної інформації.

Блок читання даних складається з одинадцяти функціональних кнопок, кожна з яких активує макрос для виклику специфічних екранних форм. Детальна інформація про стан секторів, де культивуються певні сорти рослин, стає

доступною через шість виділених кнопок навігації. Інтерфейс підтримує технологію візуального відгуку: при наведенні курсору на активні зони (назви полів або секторів) його вигляд змінюється, а натискання відкриває розширені відомості про ключові промислові об'єкти підприємства.

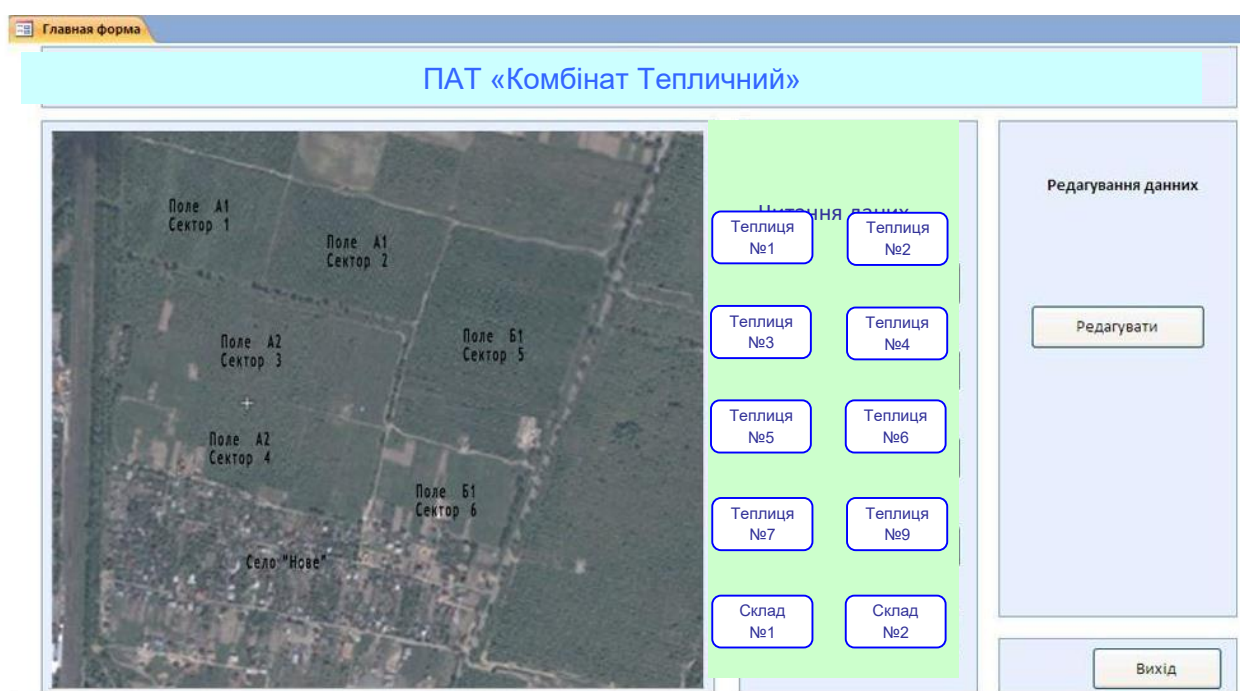


Рис. 2.15. Головне меню з об'єктами тепличного комплексу.

Доступ до функціоналу коригування інформації здійснюється через кнопку «Редагувати», яка активує панель із п'ятьма спеціалізованими елементами керування. Навігація між записами реалізована за допомогою стандартних команд: кнопка «Перший запис» забезпечує перехід до початкового елемента бази, а «Останній запис» — до фінального. Кнопки «Попередній запис» та «Наступний запис» дозволяють здійснювати послідовний перегляд даних. Для розширення бази передбачена функція «Додати запис», що ініціює створення нового порожнього поля після завершального існуючого запису. Видалення поточного об'єкта з пам'яті

системи проводиться натисканням кнопки «Видалить запис», а завершення роботи з вікном — через команду «Вихід». Деталізований алгоритм функціонування системи управління представлений у відповідних розділах додатків.

РОЗДІЛ 3. МОНТАЖ, НАЛАГОДЖЕННЯ ТА ЕКСПЛУАТАЦІЯ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ

3.1. Електрична принципова схема системи керування.

Електрична принципова схема є засадничим проектним документом, який детермінує повний перелік електричних компонентів, логіку їхніх взаємозв'язків та забезпечує вичерпне розуміння алгоритму функціонування системи. У межах кваліфікаційної роботи було розроблено схему електричну принципову для автоматизованого регулювання параметрів вологості повітря та ґрунтового субстрату в теплиці.

Функціонування схеми реалізується наступним чином: за допомогою клавіатурного модуля (SB1 ... SB4) користувач встановлює цільовий рівень вологості та визначає режим роботи пристрою — автономний або з інтеграцією до ЕОМ. Візуалізація введених параметрів та поточних показників із сенсорного блоку (PZ1) забезпечується за допомогою дисплея (HG1). Центральний мікроконтролер (DD1), згідно з програмним алгоритмом, активує симісторний оптодрайвер, який комутує магнітний пускач (KM1), що забезпечує подачу напруги на привід насосного агрегату.

Паралельно з цим група оптодрайверів через магнітні пускачі KM2 та KM3 керує приводом заслінки, яка регулює потік рідини в магістралі. Для забезпечення експлуатаційної безпеки в контурі керування передбачено кінцеві вимикачі SQ1 ... SQ2 та механізм перехресного блокування, що унеможлиблює одночасну активацію обох пускачів. Комунікація з персональним комп'ютером реалізована на базі мікросхеми DD2, яка виконує трансляцію сигналів мікроконтролера з протоколу USART у стандарт шини RS-232.

3.2. Монтаж та налагодження елементів системи керування.

Монтажу насосного агрегату передують комплекс підготовчих заходів, що включає розробку графіка робіт, розрахунок необхідних трудових ресурсів та оснащення майданчика підйомними механізмами. Тільки після завершення підготовки переходять до реконсервації, ревізії та безпосередньо встановлення обладнання. Тривалість робіт регламентується нормами для спеціального устаткування, а комплектація монтажних бригад інструментом забезпечується виконавцем робіт, хоча завод-виробник зазвичай надає специфічний інструментарій та прокладні матеріали. До експлуатації вантажопідйомної техніки допускається лише сертифікований персонал.

Початок монтажних робіт можливий лише за наявності повного пакета технічної документації, включаючи паспорти виробів, складальні креслення та інструкції з експлуатації. Обладнання, доставлене на об'єкт, підлягає обов'язковій реконсервації. Цей процес організовують так, щоб запобігти корозії очищених деталей. Після розпакування проводиться візуальний огляд на предмет пошкоджень та звірка з формулярами. Заводське мастило видаляється гасом за допомогою дрантя або мідних пластин.

Під час ревізії особлива увага приділяється підшипниковим вузлам та сальникам; вкладиші не повинні мати тріщин чи відшарувань бабіту. Після очищення обладнання зберігають у сухому місці. Монтаж агрегату зазвичай здійснюється на сталеву зварну раму, яку фіксують на фундаменті анкерними болтами. Перед установкою колодязі очищають, а положення рами вивіряють за допомогою рівнів та прокладок. Після досягнення проектною горизонтальності колодязі заливають бетоном, а остаточну затяжку болтів проводять через 7–10 діб після затвердіння розчину, завершуючи процес контролем співвісності валів.

3.3. Експлуатація системи керування.

Процедура введення електродвигуна в експлуатацію передбачає комплексний технічний огляд самого агрегату, передавальних механізмів, пускозахисної апаратури, а також перевірку надійності заземлення та кріплень. Обов'язковою є верифікація вільного обертання вала та маркування напрямку руху стрілками на корпусі. Згідно з правилами технічної експлуатації (ПТЕ), мінімально допустимий опір ізоляції двигуна та комутаційної апаратури має становити 0,5 МОм. Особлива увага приділяється заземленню: провідники повинні мати чорне забарвлення, бути доступними для візуального контролю та захищеними від механічних пошкоджень. Перед безпосереднім пуском виконується ідентифікація виводів статорної обмотки, перевірка симетрії напруги та працездатності захисту.

Для мінімізації пускових струмів асинхронних короткозамкнених машин, окрім прямого пуску, використовують методи перемикання обмоток зі схеми «зірка» на «трикутник», а також автотрансформаторний або реакторний пуск. Щоденне технічне обслуговування персоналом включає моніторинг стану обладнання та оперативне усунення дрібних дефектів при повному знеструмленні агрегату. Під час огляду необхідно:

- Виконання очищення корпусу електродвигуна від пилових наслоєнь та забруднень із застосуванням стиснутого повітря або обтиральних матеріалів; проведення візуального контролю цілісності станини, підшипникових вузлів, щитів та фланців на предмет відсутності тріщин;
- Перевірка стану нарізних з'єднань та надійності фіксації електродвигуна на фундаменті або станині робочої машини; відновлення нормативного моменту затягування ослаблених болтів і гайок;
- Контроль щільності посадки шківів та напівмуфт на валу, виконання їх додаткової фіксації за потреби;

- Ревізія системи заземлення корпусу електродвигуна; розбирання контактних з'єднань з ознаками окиснення або послаблення, очищення контактних поверхонь до металевого блиску, нанесення технічного вазеліну з наступним складанням та затягуванням; заміна заземлювального провідника у разі його розриву;
- Демонтаж кришки коробки виводів для контролю цілісності ізоляційного покриття вивідних кінців обмоток і живильних провідників; відновлення надійності контактів, зачищення поверхонь у разі окиснення або підгоряння з подальшою ізоляцією з'єднань;
- Діагностика стану змащування підшипникових вузлів; заповнення мастильної камери регламентованим матеріалом у разі потреби.

вимірювання опору ізоляції обмоток статора (міжфазного та відносно корпусу) за умови попереднього знеструмлення електродвигуна; нормативне значення показника має становити не менше 0,5 МОм. У разі виявлення суттєвого зниження діелектричної міцності необхідно провести процедуру підсушування обмоток.

діагностика вільного ходу ротора шляхом його ручного прокручування на вимкненому агрегаті для виявлення заїдань у підшипникових вузлах або критичного ексцентриситету (зачіпання ротора за статор).

контрольний пуск електродвигуна з метою акустичного моніторингу на предмет відсутності сторонніх шумів, притаманних несправностям двигуна або робочого механізму.

моніторинг температурних режимів корпусу та підшипникових щитів під час експлуатації.

До складу пускозахисної апаратури входять щити та пульти керування (з номінальною напругою до 660 В), що комплектуються комутаційними пристроями (рубильники, автоматичні вимикачі, пакетні перемикачі), електромагнітними пускачами, пристроями релейного захисту та керування, плавкими запобіжниками,

а також органами ручного керування (кнопки та кнопкові станції). Експлуатація даного обладнання допускається в сухих та вологих приміщеннях у корпусах закритого виконання. Для об'єктів із високим рівнем вологості, запиленості або наявністю хімічно агресивних середовищ передбачено використання апаратів у пиловологозахисній оболонці або їх розміщення у спеціалізованих герметичних шафах.

Категорія засобів автоматизації охоплює пристрої для контролю та регулювання температурних параметрів, вимірювання тиску і розрідження, рівнеміри для рідких та сипких середовищ, а також засоби сигналізації та реле часу.

Регламент робіт із технічного обслуговування та поточного ремонту систем автоматизації:

- проведення очищення приладів від пилових наслоєнь та зовнішніх забруднень;
- ревізія стану контактних з'єднань з їх подальшим знежирюванням;
- для засобів вимірювання тиску: контроль герметичності системи, перевірка технічного стану мембрани та верифікація нечутливості контактів до опору ізоляції між корпусом і струмопровідними елементами;
- для засобів контролю рідких та сипких середовищ: візуальний огляд цілісності мембрани та очищення робочої поверхні поплавця.

Перелік робіт, що виконуються під час поточного ремонту систем автоматизації:

- розбирання вузлів із подальшим очищенням від пилу та бруду, а також перевірка стану мастильних матеріалів;
- для засобів вимірювання тиску: заміна мембрани у разі виявлення ознак зносу (глибоких канавок або тріщин), контроль похибки спрацьовування при розмиканні контактів;

- для пристроїв вимірювання сипких та рідких середовищ: заміна поплавця у разі втрати ним експлуатаційних властивостей;
- комплексний контроль стану контактних груп із проведенням їх заміни за потреби.

З метою запобігання передчасному виходу з ладу компонентів автоматизації та підтримання їх у працездатному стані впроваджується комплекс профілактичних заходів, що включає:

- a) поточне технічне обслуговування та моніторинг функціонування систем автоматичного регулювання (САР) із обов'язковою фіксацією результатів у журналах експлуатації;
- b) періодичні обстеження та випробування згідно із затвердженим графіком. Ці заходи спрямовані на оцінку загального технічного стану САР, виявлення ознак прихованих дефектів, контроль стану ізоляції та визначення переліку вузлів, що потребують заміни. Зазначені роботи виконуються майстрами-наладчиками;
- c) планово-запобіжні ремонти (ПЗР), які здійснюються за результатами проведених випробувань для оперативного усунення дефектів і забезпечення справності всіх елементів системи автоматичного керування (САК). При виконанні робіт ремонтна бригада керується протоколами випробувань та записами в журналах експлуатації, де зафіксовані несправності, виявлені черговим персоналом;
- d) профілактичну заміну зношеного обладнання або його окремих частин на основі дефектних відомостей до настання терміну наступного планового ремонту. Роботи проводить обслуговуючий персонал за розпорядженням керівника ремонтної бригади у терміни, узгоджені з графіком постачання запасних частин та виробничими можливостями. До моменту заміни за обладнанням встановлюється нагляд чергового

персоналу. Своєчасна заміна елементів у міжремонтний період сприяє підвищенню надійності САК та оптимізації ремонтного циклу.

Планування профілактичних заходів здійснюється на перспективний період 1–2 роки. Терміни проведення окремих робіт встановлюються залежно від специфіки систем автоматизації підприємства та вимог чинних нормативних інструкцій. Обов'язковою умовою є суворе дотримання технологічної послідовності виконання робіт у межах системи профілактики.

РОЗДІЛ 4. КОШТОРИСНІ РОЗРАХУНКИ

Економічна ефективність автоматизації визначається рівнем зниження сукупних витрат живої та упередметненої праці на одиницю виготовленої продукції. Впровадження автоматизації у сільськогосподарські виробничі процеси, як правило, супроводжується зростанням капітальних інвестицій при одночасному суттєвому скороченні експлуатаційних витрат на одиницю продукції. Отже, критерієм ефективності автоматизації є загальне зменшення собівартості виробництва одиниці продукції.

Загальна вартість технічних засобів автоматизації визначається за формулою (5.1):

$$K_3 = K_{\text{дв}} + K_{\text{д}} + K_{\text{р}} + K_{\text{клап}} + K_{\text{щ}} \quad (4.1)$$

де: $K_{\text{дв}} = 9000$ грн. – вартість двигунів;

$K_{\text{д}} = 1500$ грн. – вартість датчиків;

$K_{\text{р}} = 3550$ грн. – вартість регулятора;

$K_{\text{щ}} = 640$ грн. – вартість щита керування ;

$K_{\text{клап}} = 10000$ грн. – вартість клапанів;

Отже: $K_3 = 9000 + 1500 + 3550 + 640 + 10000 = 14690$ грн.

Торгівельно-транспортні витрати будуть становити (5.2):

$$K_{\text{т.т.}} = 0.11 \cdot K_3 = 0.11 \cdot 14690 = 1615,9 \text{ грн.} \quad (4.2)$$

Витрати на монтаж технічних засобів становлять (5.3):

$$K_M = 0.17 \cdot K_3 = 0.17 \cdot 14690 = 2497,3 \text{ грн.} \quad (4.3)$$

Витрати на прокладення проводок (5.4):

$$K_{\text{пр}} = K_{\text{п}} \cdot l; \quad (4.4)$$

$$K_{\text{пр}} = 9 \cdot 135 = 1215;$$

де: $K_{\text{п}} = 9 \text{ грн./м}$ – вартість проводки та їх монтажу;

l – довжина проводки $l = 135$;

Інші капітальні витрати будуть становити 2% від суми капітальних вкладень

$$K_i = 0.02 \cdot 14690 = 293,8 \text{ грн.}$$

Капітальні витрати будуть становити (5.5):

$$K = K_3 + K_i + K_{\text{т,г}} + K_M + K_{\text{пр}} \quad (4.5)$$

$$K = 14690 + 293,8 + 1615,9 + 2497,3 + 1215 = 20310,8$$

На основі розрахованої суми капіталовкладень визначається величина амортизаційних відрахувань за формулою (5.6):

$$C_a = 0.142 \cdot K = 0.142 \cdot 20310,8 = 2884,13 \text{ грн.} \quad (4.6)$$

Витрати на поточний ремонт будуть становити формула (5.7):

$$C_{\text{пр}} = 0.18 \cdot K = 0.18 \cdot 20310,8 = 3655,94 \text{ грн.} \quad (4.7)$$

Витрати на енергоресурси будуть становити формула (5.8):

$$C_e = P \cdot \Gamma \cdot 0.21, \quad (4.8)$$

де: P – потужність автоматизації = 65 кВт.

Γ – кількість годин роботи = $365 \cdot 24 \cdot 0,7 = 6132$ год.

Отже, $C_e = 65 \cdot 6132 \cdot 0.21 = 85188$ грн.

Розрахунок витрат на оплату праці персоналу, задіяного в експлуатації системи автоматизації (у даному випадку — двох операторів), здійснюється за формулою (5.9):

$$C_3 = 2 \cdot 8 \cdot 12 \cdot 300 = 87600 \text{ грн.} \quad (4.9)$$

де: 1 – кількість операторів;

12 - грн/год. – ставка оператора;

8 – години роботи на добу;

300 – кількість діб роботи на рік.

Отже, річні експлуатаційні витрати будуть становити співвідношення (5.10):

$$C = 2884 + 3655 + 5188 + 7600 = 22027 \text{ грн.}$$

(4.10)

Розрахунок основних показників економічної ефективності.

На основі отриманих значень річних експлуатаційних витрат та обсягу капітальних інкладень визначається величина зведених витрат за формулою (5.11):

$$B_{зв} = C + E_n \cdot K = 22027 + 0.15 \cdot 20310,8 = 25073,5 \text{ грн.}$$

(4.11)

Тоді чистий прибуток буде визначатись за формулою (5.12):

$$\Pi = \Delta C_3 + \Delta C_e$$

(4.12)

де: ΔC_e – прибуток за рахунок економії електричної енергії;

$$\Delta C_3 = C_3 - (1.2 \cdot \Gamma \cdot 0.1) = 87600 - (1.2 \cdot 6132 \cdot 0.21) = 86055 \text{ грн.}$$

$$\Delta C_e = C_e - (P \cdot \Gamma \cdot 0.1 \cdot \Delta \Pi) = 85188 - (45 \cdot 6132 \cdot 0.1 \cdot 0.4) = 13037 \text{ грн.};$$

$\Delta \Pi = 0.4 = 40\%$ - економія часу енергоспоживання при автоматизації.

$$\text{Тоді: } \mathcal{C} = 86055 + 13037 = 67092 \text{ грн.}$$

Термін окупності установки визначається за формулою (5.13):

$$T_{\text{окуп}} = K/\mathcal{C} = 20310,8 / 67092 \approx 0,3 \text{ рік}$$

(4.13)

Аналіз отриманих розрахункових даних свідчить, що величина чистого прибутку становить 67092 грн, а розрахунковий термін окупності впровадженої системи автоматизації складає 0,3 року.

ВИСНОВКИ

У межах кваліфікаційного проєкту проведено комплексний аналіз теплиці як об'єкта автоматизації, за результатами якого ідентифіковано її динамічні параметри та отримано передавальні функції. Розроблена САК забезпечує стабілізацію вологості з прецизійною точністю $\pm 2\%$. Синтезована система демонструє високу якість перехідного процесу: час регулювання становить $t_p = 350$ с, рівень перерегулювання не перевищує $5,3\%$, а показник коливальності $N=1$, що повністю відповідає агротехнічним нормам. Розраховані частотні показники підтверджують стійкість системи з достатніми запасами за амплітудою та фазою.

Апаратна реалізація базується на використанні сучасних компонентів із каталогів 2026 року: мікроконтролера Arduino Mega 2560, комбінованого сенсора DHT-11 та спеціалізованого датчика вологості ґрунту 10HS. Технічне рішення включає раціональний підбір пускозахисного обладнання та кабельно-провідникової продукції, що дозволило досягти високого коефіцієнта надійності системи на рівні 0,951. Інтеграція програмного середовища LabVIEW забезпечила створення віртуальної панелі оператора, ефективний моніторинг субстрату та глибинний аналіз динаміки системи, що спрощує подальшу модернізацію САК. Економічний аналіз підтвердив високу рентабельність проєкту з терміном окупності всього 0,3 року.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Aldrich R. A., Bartok J. W. Greenhouse Engineering. — Ithaca : NRAES Publishing, 1994. — 212 p.
2. Allen R. G., Pereira L. S., Raes D., Smith M. Crop Evapotranspiration — Guidelines for Computing Crop Water Requirements. — Rome : FAO Irrigation and Drainage Paper 56, 1998. — 300 p.
3. Boyer S. A. SCADA: Supervisory Control and Data Acquisition. — 4th ed. — Research Triangle Park : ISA, 2009. — 336 p.
4. Bucks D. A., Nakayama F. S., Gilbert R. G. Trickle Irrigation Water Quality and Preventive Maintenance // Agricultural Water Management. — 1979. — Vol. 2, № 2. — P. 149–162.
5. Dorais M. Advances in Soilless Cultivation under Protected Agriculture // Acta Horticulturae. — 2007. — Vol. 747. — P. 33–47.
6. Jones J. W. Irrigation Scheduling: Advantages and Pitfalls of Plant-Based Methods // Journal of Experimental Botany. — 2004. — Vol. 55, № 407. — P. 2427–2436.
7. Keller J., Bliesner R. D. Sprinkle and Trickle Irrigation. — New York : Springer, 1990. — 652 p.
8. Kim Y., Evans R. G., Iversen W. M. Remote Sensing and Control of an Irrigation System Using a Distributed Wireless Sensor Network // IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement. — 2008. — Vol. 57, № 7. — P. 1379–1387.
9. Michael A. M. Principles of Agricultural Engineering. — 2nd ed. — New Delhi : Jain Brothers, 2008. — Vol. II. — 801 p.
10. Ojha T., Misra S., Raghuwanshi N. S. Wireless Sensor Networks for Agriculture: The State-of-the-Art in Practice and Future Challenges // Computers and Electronics in Agriculture. — 2015. — Vol. 118. — P. 66–84.
11. Petruzella F. D. Programmable Logic Controllers. — 5th ed. — New York : McGraw-Hill Education, 2016. — 432 p.

12. Regtien P. P. L. *Sensors for Mechatronics*. — Amsterdam : Elsevier, 2012. — 344 p.
13. Shamshiri R. R., Kalantari F., Ting K. C. et al. *Advances in Greenhouse Automation and Controlled Environment Agriculture: A Transition to Plant Factories and Urban Agriculture // International Journal of Agricultural and Biological Engineering*. — 2018. — Vol. 11, № 1. — P. 1–22.
14. Zhang Q. *Precision Agriculture Technology for Crop Farming*. — Boca Raton : CRC Press, 2015. — 392 p.
15. Zhu Y. *Embedded Systems with ARM Cortex-M Microcontrollers in Assembly Language and C*. — 3rd ed. — California : E-Man Press, 2017. — 626 p.
16. Бойко В. С., Сніжко В. В. *Автоматизація технологічних процесів та системи автоматичного керування*. — Київ : Ліра-К, 2015. — 344 с.
17. Голуб Г. А., Чуба В. В. *Мікропроцесорні системи керування технологічними процесами*. — Київ : НУБіП України, 2016. — 255 с.
18. Гуменюк І. М. *Сенсори та виконавчі механізми в системах автоматизації*. — Тернопіль : ТНТУ ім. І. Пулюя, 2019. — 214 с.
19. ДСТУ 4513:2006. *Системи автоматизації технологічних процесів. Основні положення та терміни*. — Київ : Держспоживстандарт України, 2007. — 45 с.
20. ДСТУ EN 60204-1:2015. *Безпечність машин. Електрообладнання машин і механізмів. Загальні вимоги*. — Київ : ДП «УкрНДНЦ», 2016. — 98 с.
21. Ковальчук П. І. *Сільськогосподарські меліорації : підручник*. — Київ : Аграрна освіта, 2007. — 560 с.
22. Михайлов Ю. О., Орлов О. І. *Автоматизація виробничих процесів у сільському господарстві*. — Харків : ХНТУСГ ім. П. Василенка, 2012. — 286 с.
23. Мартиненко І.І., Лисенко В.П., Тищенко Л.П., Болбот І.М., Олійник П.В. *Проектування систем електрифікації та автоматизації АПК: Підручник* – К., 2008. – 330с.

24. Ромащенко М. І., Корюненко В. М. Ефективність застосування краплинного зрошення у тепличному господарстві // Меліорація і водне господарство. — 2020. — № 108. — С. 74–82.
25. Ромащенко М. І., Шатковський А. П. Краплинне зрошення : навчальний посібник. — Херсон : Айлант, 2014. — 296 с.
26. Сніжко В. В., Кравець О. П. Комп'ютерно-інтегровані системи автоматизації. — Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2020. — 340 с.
27. Ткаченко В. І. Проєктування комп'ютеризованих систем керування технологічними процесами. — Дніпро : НТУ «ДП», 2017. — 290 с.
28. Федоренко І. Я., Козирський В. В. Системи автоматизації та комп'ютерно-інтегровані технології в АПК. — Київ : НУБіП України, 2018. — 412 с.
29. Штойко П. І. Основи автоматики та автоматизації технологічних процесів. — Львів : Новий Світ-2000, 2011. — 320 с.

ДОДАТКИ

Алгоритм роботи програмного забезпечення ПК для взаємодії з САК





