

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

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

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

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

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

« ____ » _____ 2026 р.

« ____ » _____ 2026 р.

МАГІСТЕРСЬКА КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

**на тему: «КОМП'ЮТЕРНО-ІНТЕГРОВАНА СИСТЕМА КЕРУВАННЯ
МІКРОКЛІМАТОМ В ТЕПЛИЦІ ІЗ ВИКОРИСТАННЯМ
КОМПЛЕКСУ ТЕХНІЧНИХ ЗАСОБІВ SCHNEIDER ELECTRIC»**

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

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

Орієнтація освітньої програми: освітньо-наукова
(назва)

Гарант освітньої програми

_____ **д.т.н., професор**
(науковий ступінь та вчене звання)

_____ (підпис)

Івашук В.В.
(П.І.Б)

Керівник магістерської кваліфікаційної роботи

_____ **к.т.н., доцент**
(науковий ступінь та вчене звання)

_____ (підпис)

Грищенко В.О.
(П.І.Б)

Виконав

_____ (підпис)

Потапенко Д.В.
(П.І.Б студента)

КИЇВ-2026

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

ЗАТВЕРДЖУЮ

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

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

ЗАВДАННЯ
ДО ВИКОНАННЯ МАГІСТЕРСЬКОЇ КВАЛІФІКАЦІЙНОЇ РОБОТИ ЗДОБУВАЧУ
Потапенку Давиду Віталійовичу

Спеціальність:

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

Освітньо-професійна програма:

Автоматизація, комп'ютерно-інтегровані технології та робототехніка

Орієнтація освітньої програми: освітньо-наукова

Тема магістерської кваліфікаційної роботи **«Комп'ютерно-інтегрована система керування мікрокліматом в теплиці із використанням комплексу технічних засобів Schneider Electric»**,

затверджена наказом від 18.11.2024 року №2057«С»

Термін подання студентом магістерської роботи 15.05.2026 року

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

Перелік питань, що підлягають дослідженню:

1. Провести аналіз технологічного процесу.
2. Виконати математичне моделювання динаміки мікроклімату теплиці.
3. Провести вибір технічних засобів та синтез цифрової системи керування.
4. Виконати технічне проектування та програмна реалізація.
5. Оцінити економічну ефективність системи автоматизації.

Дата видачі завдання «19» листопада 2024 року

Керівник магістерської кваліфікаційної роботи

Завдання прийняв до виконання

(Підпис)

(Підпис)

Грищенко В.О.
(Прізвище та ініціали)

Потапенко Д.В.
(Прізвище та ініціали)

ЗМІСТ

ВСТУП.....	5
РОЗДІЛ 1 АНАЛІЗ ТЕХНОЛОГІЧНОГО ПРОЦЕСУ	7
1.1. Загальна характеристика тепличного комплексу та його технологічного призначення.	7
1.2. Агротехнічні вимоги до параметрів мікроклімату та аналіз причин їх порушення.....	10
1.3. Вплив зовнішніх кліматичних факторів та інсоляції на внутрішнє середовище.....	14
1.4. Аналіз каналів керування: керовані, контрольовані та некеровані змінні об'єкта.	17
1.5. Огляд існуючих технічних рішень з автоматизації теплиць та аналіз їх недоліків.....	20
1.6. Обґрунтування доцільності впровадження комп'ютерно-інтегрованої системи.....	24
РОЗДІЛ 2. МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ДИНАМІКИ МІКРОКЛІМАТУ ТЕПЛИЦІ	29
2.1. Фізична постановка задачі та обґрунтування переходу до моделі із зосередженими параметрами.	29
2.2. Розширена система рівнянь тепловологого балансу із зосередженими параметрами.....	32
2.3. Лінеаризація нелінійних зв'язків та формування узагальненої моделі.	36
2.4. Аналітичний розв'язок узагальненої моделі.	39
2.5. Розробка функціонально-технологічної схеми автоматизації.	43
РОЗДІЛ 3. ВИБІР ТЕХНІЧНИХ ЗАСОБІВ ТА СИНТЕЗ ЦИФРОВОЇ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ	49
3.1. Обґрунтування загальної структури комп'ютерно-інтегрованої системи керування.	49
3.2. Специфікація та технічні характеристики комплексу засобів автоматизації.	51
3.3. Синтез та дискретизація цифрових регуляторів температури та вологості.....	59
3.4. Аналіз стійкості та якості замкненої цифрової системи керування.	61

РОЗДІЛ 4. ТЕХНІЧНЕ ПРОЕКТУВАННЯ ТА ПРОГРАМНА РЕАЛІЗАЦІЯ.....	66
4.1. Обґрунтування схемотехнічних рішень та розробка принципових електричних схем.	66
4.2. Розробка алгоритмів функціонування системи керування мікрокліматом.....	75
4.3. Програмна реалізація алгоритмів керування у середовищі розробки ПЛК.....	77
4.4. Проектування людино-машинного інтерфейсу та SCADA-системи моніторингу.	81
РОЗДІЛ 5. ЕКОНОМІЧНА ЕФЕКТИВНІСТЬ СИСТЕМИ АВТОМАТИЗАЦІЇ.....	86
5.1. Розрахунок капітальних витрат на проектування та впровадження системи.	86
5.2. Розрахунок терміну окупності та інтегральних показників економічної ефективності.	88
ВИСНОВКИ	92
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	93

ВСТУП

Актуальність теми зумовлена зростанням вимог до ефективного та енергоощадного ведення тепличного господарства в умовах сучасного агропромислового виробництва. Підвищення вартості енергоносіїв, необхідність забезпечення стабільного отримання врожаю незалежно від сезонних і погодних коливань, а також посилення вимог до якості сільськогосподарської продукції зумовлюють потребу впровадження комп'ютерно-інтегрованих систем керування мікрокліматом. Використання сучасних засобів автоматизації, зокрема обладнання компанії Schneider Electric, дозволяє забезпечити точне регулювання параметрів внутрішнього середовища теплиці, зменшити вплив людського фактору та підвищити енергоефективність технологічних процесів.

Об'єктом дослідження є процес формування та підтримання мікроклімату в теплиці як складної багатопараметричної динамічної системи, що включає взаємопов'язані процеси тепло- та вологообміну, а також вплив зовнішніх кліматичних факторів.

Предметом дослідження є методи та засоби комп'ютерно-інтегрованого керування параметрами мікроклімату теплиці, зокрема температурою та вологістю повітря, із застосуванням програмно-апаратних засобів автоматизації на базі промислових контролерів, датчиків і виконавчих механізмів, а також використання математичної моделі об'єкта для аналізу динамічних властивостей системи керування.

Метою дослідження є підвищення ефективності підтримки мікроклімату в теплиці шляхом розробки та обґрунтування комп'ютерно-інтегрованої системи керування мікрокліматом, що забезпечує стабілізацію основних параметрів середовища та оптимізацію енергоспоживання. Для досягнення поставленої мети передбачається вирішення задач з аналізу існуючих систем керування мікрокліматом теплиць, розробка структурної та функціональної схеми системи, обґрунтування вибору технічних засобів

автоматизації, формування алгоритмів регулювання температури та вологості, а також визначення динамічних властивостей об'єкта керування шляхом отримання його передатних функцій для відповідних каналів впливу.

Методи дослідження базуються на положеннях теорії автоматичного керування, системного аналізу складних об'єктів, а також методах ідентифікації динамічних систем, що дозволяють отримати передатні функції об'єкта за каналами регулювання температури та вологості повітря в теплиці. Додатково застосовуються методи математичного моделювання, аналізу перехідних процесів і проектування комп'ютерно-інтегрованих систем керування із використанням сучасних промислових засобів автоматизації.

РОЗДІЛ 1

АНАЛІЗ ТЕХНОЛОГІЧНОГО ПРОЦЕСУ

1.1. Загальна характеристика тепличного комплексу та його технологічного призначення.

Тепличний комплекс являє собою складний агротехнічний об'єкт, призначений для створення штучно керованого середовища вирощування сільськогосподарських культур. Його основна функція полягає у формуванні стабільних умов мікроклімату, які забезпечують оптимальні параметри росту рослин незалежно від сезонних змін та зовнішніх погодних факторів. У технологічному аспекті теплиця поєднує будівельні конструкції, інженерні системи та засоби автоматизації, що працюють як єдиний комплекс, орієнтований на підтримання заданих агрокліматичних режимів (рис. 1.1).



Рисунок 1.1 – Загальний вигляд теплиці

Технологічне призначення тепличного комплексу полягає у забезпеченні контрольованого середовища, де основні параметри, такі як температура повітря, вологість, інтенсивність повітрообміну та рівень освітлення, підтримуються в межах заданих технологічних норм. Це дозволяє мінімізувати вплив зовнішніх кліматичних умов та створити стабільні передумови для інтенсивного росту рослин, підвищення врожайності та покращення якості продукції, тобто, тепличний комплекс виконує функцію керованої виробничої системи, в якій природні процеси адаптуються до вимог технології вирощування.

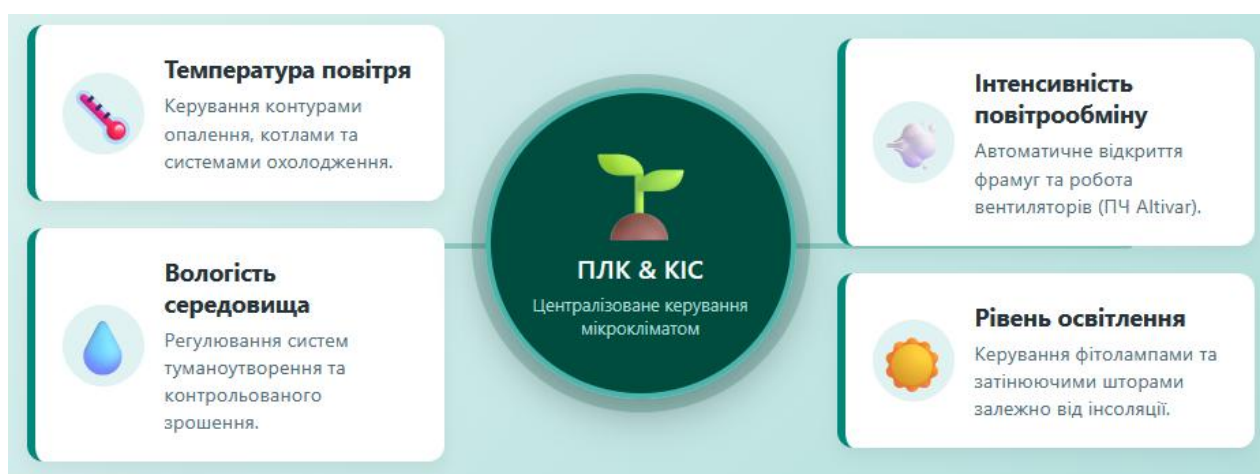


Рисунок 1.2 – Контрольоване середовище теплиці

Тепличний комплекс є багатофункціональною системою, у якій одночасно протікають теплові, вологісні та аеродинамічні процеси, що взаємно впливають один на одного. Формування мікроклімату визначається балансом між надходженням енергії від сонячної радіації, роботою систем опалення, втратами через огорожувальні конструкції та процесами повітрообміну. Додатково значний вплив мають біологічні процеси рослин, зокрема транспірація, яка безпосередньо змінює вологісний режим внутрішнього середовища.

Особливістю тепличного комплексу є його залежність від зовнішніх умов, які виступають у ролі неконтрольованих впливів. До них належать коливання температури зовнішнього повітря, зміна вологості, швидкість вітру

та рівень сонячного випромінювання. У поєднанні з внутрішніми технологічними процесами це формує складну динамічну систему з високим рівнем невизначеності та постійною необхідністю корекції параметрів мікроклімату.

У структурному плані тепличний комплекс включає декілька взаємопов'язаних підсистем, серед яких можна виділити системи опалення, вентиляції, зволоження, освітлення та керування (рис. 1.3). Їх спільна робота забезпечує підтримання заданих технологічних параметрів, однак водночас створює складні взаємозв'язки між окремими каналами впливу. Зміна одного параметра середовища неминуче викликає реакцію інших, що ускладнює процес стабілізації мікроклімату та потребує застосування узгоджених алгоритмів керування.

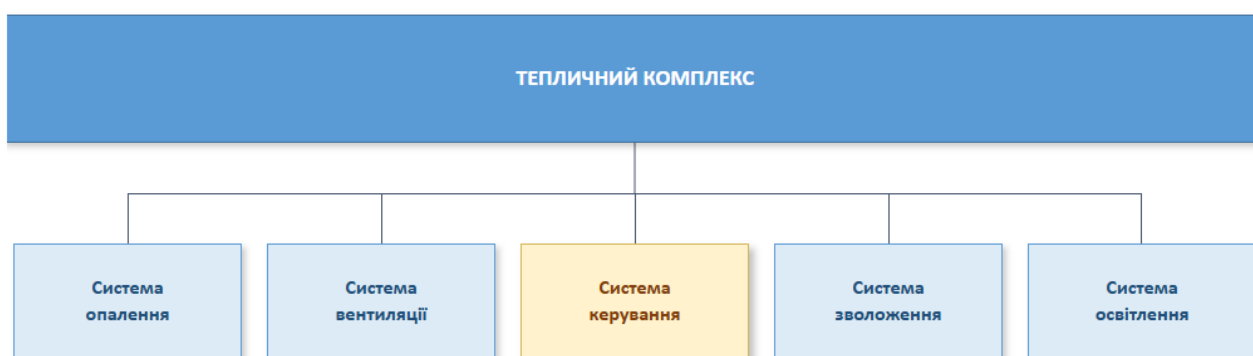


Рисунок 1.3 – Структура підсистем тепличного комплексу

Сучасні тепличні комплекси дедалі частіше інтегруються з комп'ютеризованими системами моніторингу та автоматизації, які забезпечують безперервний контроль параметрів середовища та оперативне регулювання виконавчих механізмів. У промислових рішеннях широко використовуються технології автоматизації, зокрема обладнання компанії Schneider Electric, що дозволяє реалізувати централізоване керування технологічними процесами та підвищити енергоефективність функціонування комплексу.

Таким чином, тепличний комплекс слід розглядати як високотехнологічний виробничий об'єкт, призначений для керованого

формування мікроклімату з метою забезпечення стабільного та ефективного сільськогосподарського виробництва. Його технологічна складність та багатофакторність процесів обґрунтовують необхідність впровадження сучасних систем автоматизації, здатних забезпечити точне та адаптивне регулювання внутрішніх умов.

1.2. Агротехнічні вимоги до параметрів мікроклімату та аналіз причин їх порушення.

Забезпечення життєдіяльності рослин в умовах теплиць (штучного агробіоценозу) безпосередньо залежить від стабільності та збалансованості фізичних параметрів навколишнього повітряного середовища. Мікроклімат культивацийної споруди розглядається як багатокомпонентна динамічна система, де температурний, вологісний та газовий режими перебувають у нерозривному взаємозв'язку, визначаючи інтенсивність фотосинтезу, транспірації та мінерального живлення культур. Будь-яке відхилення від фізіологічної норми призводить до гальмування ростових процесів, зниження імунітету рослин та суттєвих втрат товарної врожайності [1-2]. Тому формування алгоритмів керування технічними засобами теплиці має базуватися виключно на критичних потребах рослинного ценозу на кожному етапі його онтогенезу.

Температурний режим є провідним чинником, що регулює швидкість біохімічних реакцій у клітинах рослин. Для більшості промислових тепличних культур існує чітко визначений оптимальний діапазон температур, який зазвичай диференціюється на денний та нічний періоди для підтримання природного процесу термоперіодизму (табл. 1.1). Протягом світлої пори доби вища температура стимулює асиміляцію вуглекислого газу, тоді як нічне зниження температури уповільнює дихання, зменшуючи невинновдані витрати накопичених за день цукрів [2-4]. Порушення цього балансу у бік перегріву, особливо за умов інтенсивної сонячної інсоляції, викликає тепловий стрес, за якого рослина вимушено закриває продихи для економії вологи, що зупиняє

фотосинтез та призводить до стерильності пилку. З іншого боку, тривале зниження температури нижче допустимих меж уповільнює поглинання поживних речовин кореневою системою, гальмує розвиток листової маси та створює сприятливі умови для поширення грибкових патогенів.

Таблиця 1.1 – Агротехнічні регламенти температурних та вологісних режимів для основних промислових культур захищеного ґрунту залежно від фази вегетації та рівня освітленості

Назва культури	Фаза вегетаційного розвитку	Рівень інсоляції / Період доби, Вт/м ²	Оптимальний діапазон температур, °С	Відносна вологість повітря, %
Томат	розсада та активний вегетативний ріст	ясний день (>300) хмарний день (<150) нічний період	22 – 24 18 – 20 15 – 16	60 – 65 60 – 65 65 – 70
	цвітіння та масове плодоношення	ясний день (>400) хмарний день (<150) нічний період	24 – 26 20 – 22 17 – 18	65 – 70 65 – 70 70 – 75
Огірок	розсада та активний вегетативний ріст	ясний день (>300) хмарний день (<150) нічний період	24 – 26 20 – 22 18 – 19	70 – 75 70 – 75 75 – 80
	цвітіння та масове плодоношення	ясний день (>400) хмарний день (<150) нічний період	26 – 28 22 – 24 19 – 21	75 – 80 75 – 80 80 – 85
Перець солодкий	розсада та активний вегетативний ріст	ясний день (>300) хмарний день (<150) нічний період	23 – 25 20 – 21 17 – 18	60 – 65 60 – 65 65 – 70
	цвітіння та масове плодоношення	ясний день (>400) хмарний день (<150) нічний період	25 – 27 21 – 23 18 – 20	65 – 70 65 – 70 70 – 75

Регулювання вологісного режиму в теплиці з погляду рослинної фізіології тісно пов'язане із дефіцитом тиску водяної пари, який визначає рушійну силу транспірації. Оптимальний рівень відносної вологості повітря дозволяє рослинам підтримувати необхідний тургор у клітинах та забезпечує

безперервний висхідний потік води і мінеральних елементів від коренів до точок росту [3-4]. Причиною серйозних фізіологічних порушень стає як надмірна, так і недостатня вологість. За умов критичного насичення повітря вологою транспірація практично припиняється, що блокує надходження кальцію та інших маломобільних елементів до молодого листа, викликаючи такі захворювання як вершинна гниль або некрози. Крім того, висока вологість сприяє утворенню конденсату на листових пластинах, що є тригером для розвитку інфекцій. Навпаки, надмірно сухе повітря провокує лавиноподібне випаровування вологи, з яким коренева система може не впоратися, що змушує рослину знову ж таки блокувати продиховий апарат, зупиняючи продуктивний ріст.

Повітрообмін та функціонування вентиляційних систем у тепличному просторі забезпечують не лише терморегуляцію, а й безпосередньо впливають на газовий баланс агрофітоценозу. У процесі активного фотосинтезу в денні години рослини швидко поглинають вуглекислий газ із навкололистового простору, утворюючи так званий збіднений приземний шар через прикордонний опір повітря (рис. 1.4). Відсутність належного руху повітряних мас призводить до локального вуглекислотного голодування, що суттєво обмежує ефективність світлових реакцій фотосинтезу, навіть за ідеальних умов освітлення та температури [1-4].

Контрольована вентиляція руйнує цей статичний повітряний прошарок біля листа, відновлює концентрацію вуглекислого газу до природного рівня або рівня штучного підживлення, а також видаляє надлишки латентного тепла, що виділяється у вигляді пари під час випаровування.

Аналіз причин дестабілізації мікроклімату та порушення агротехнічних норм дозволяє розділити їх на дві ключові категорії, пов'язані із зовнішніми природними чинниками та внутрішніми особливостями об'єкта. Зовнішні причини зумовлені різкими, часто непередбачуваними змінами погодних умов, такими як східчасті коливання сонячної активності при мінливій хмарності, проходження атмосферних фронтів, шквалисті вітри або різке нічне

похолодання (рис. 1.5).

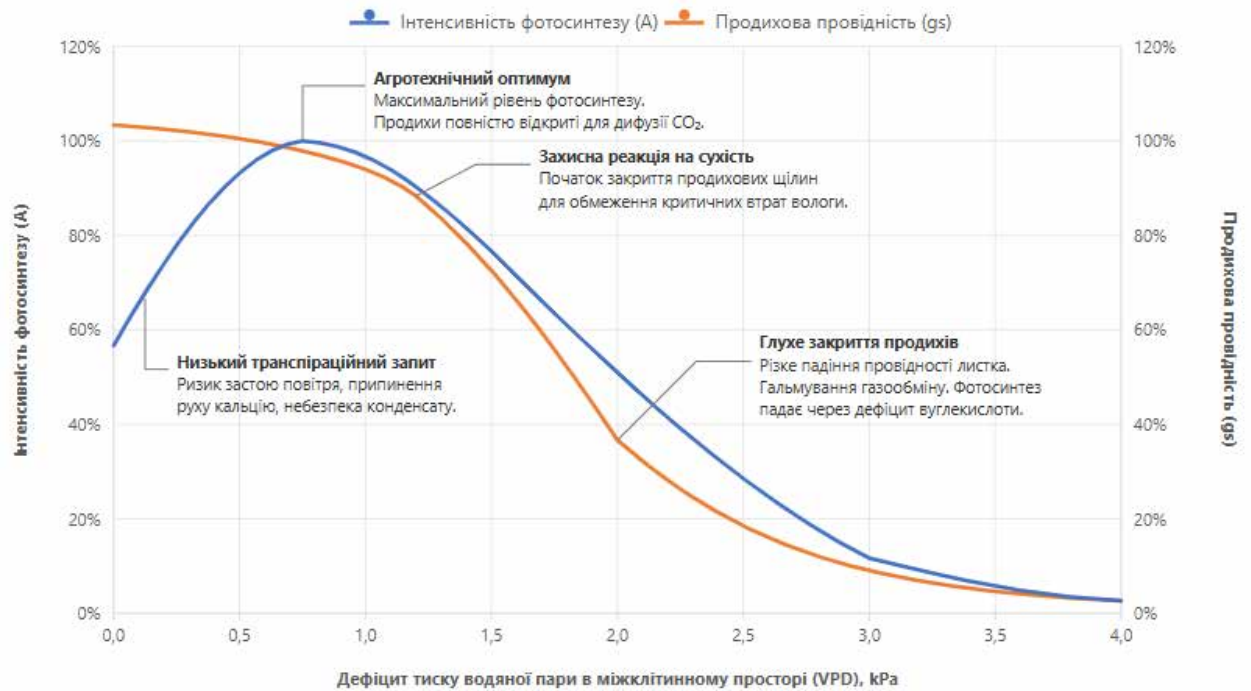


Рисунок 1.4 – Графічна залежність інтенсивності фотосинтезу та продигової провідності листка від дефіциту тиску водяної пари (VPD) у міжклітинному просторі

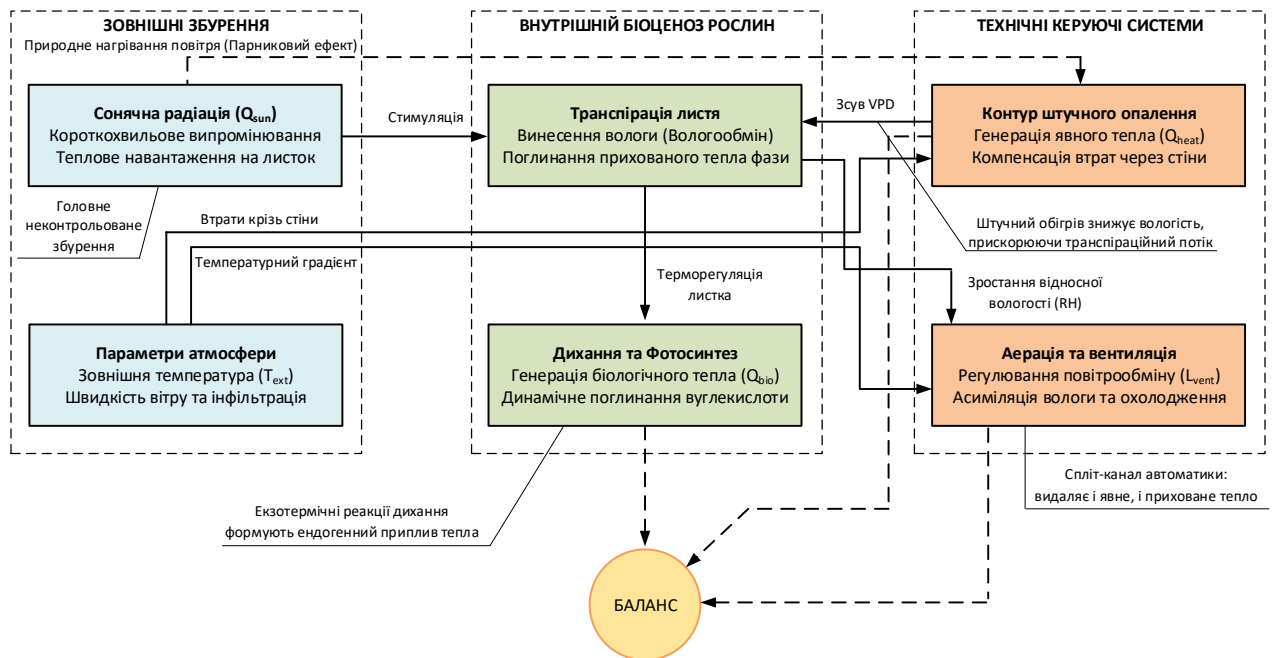


Рисунок 1.5 – Схема взаємодії внутрішніх біологічних процесів рослинного ценозу (транспірація, дихання) з інженерними підсистемами теплиці в умовах динамічних погодних збурень

Внутрішні чинники порушень режиму коріняться у високій тепловій та

вологісній інерції самого об'єкта керування, викликаній великою масою рослин та зволоженого субстрату [1-2]. Оскільки біомаса постійно виділяє вологу та акумулює тепло, технічні системи обігріву чи провітрювання через власну конструктивну запізнюваність часто не встигають компенсувати швидкі зовнішні збурення, що призводить до небезпечних динамічних вибігів температури та вологості за межі агротехнічних допусків.

1.3. Вплив зовнішніх кліматичних факторів та інсоляції на внутрішнє середовище.

Тепличний комплекс як об'єкт автоматичного керування функціонує в умовах безперервного та агресивного впливу навколишнього середовища. Огороджувальні конструкції споруди мають високий коефіцієнт теплопередачі, через що внутрішні параметри повітряного простору критично залежать від поточних метеорологічних умов. Основними зовнішніми чинниками, які дестабілізують мікроклімат і вимагають постійної компенсації з боку інженерних систем, є сонячна радіація, температура навколишнього повітря, швидкість і напрямок вітру, а також атмосферні опади. Розуміння механізмів цього впливу є базовою передумовою для побудови адекватної математичної моделі та синтезу ефективної комп'ютерно-інтегрованої системи керування.

Короткохвильова сонячна інсоляція виступає найпотужнішим, але водночас найбільш нестабільним джерелом теплової енергії. Проникаючи крізь світлопрозоре покриття теплиці, сонячне випромінювання поглинається елементами конструкцій, ґрунтом, субстратом та листовою поверхнею фітоценозу, де трансформується у довгохвильову теплову енергію (рис. 1.6). Оскільки покриття теплиці є практично непроникним для цього вторинного довгохвильового випромінювання, всередині споруди виникає класичний парниковий ефект [5]. У ясні дні тепла потужність від сонячної радіації може в кілька разів перевищувати максимальну потужність системи штучного опалення. Це призводить до лавиноподібного перегріву повітряного простору навіть за низьких зовнішніх температур, що зумовлює необхідність

термінового включення систем вентиляції чи затінення для запобігання термічного шоку рослин (рис. 1.7).

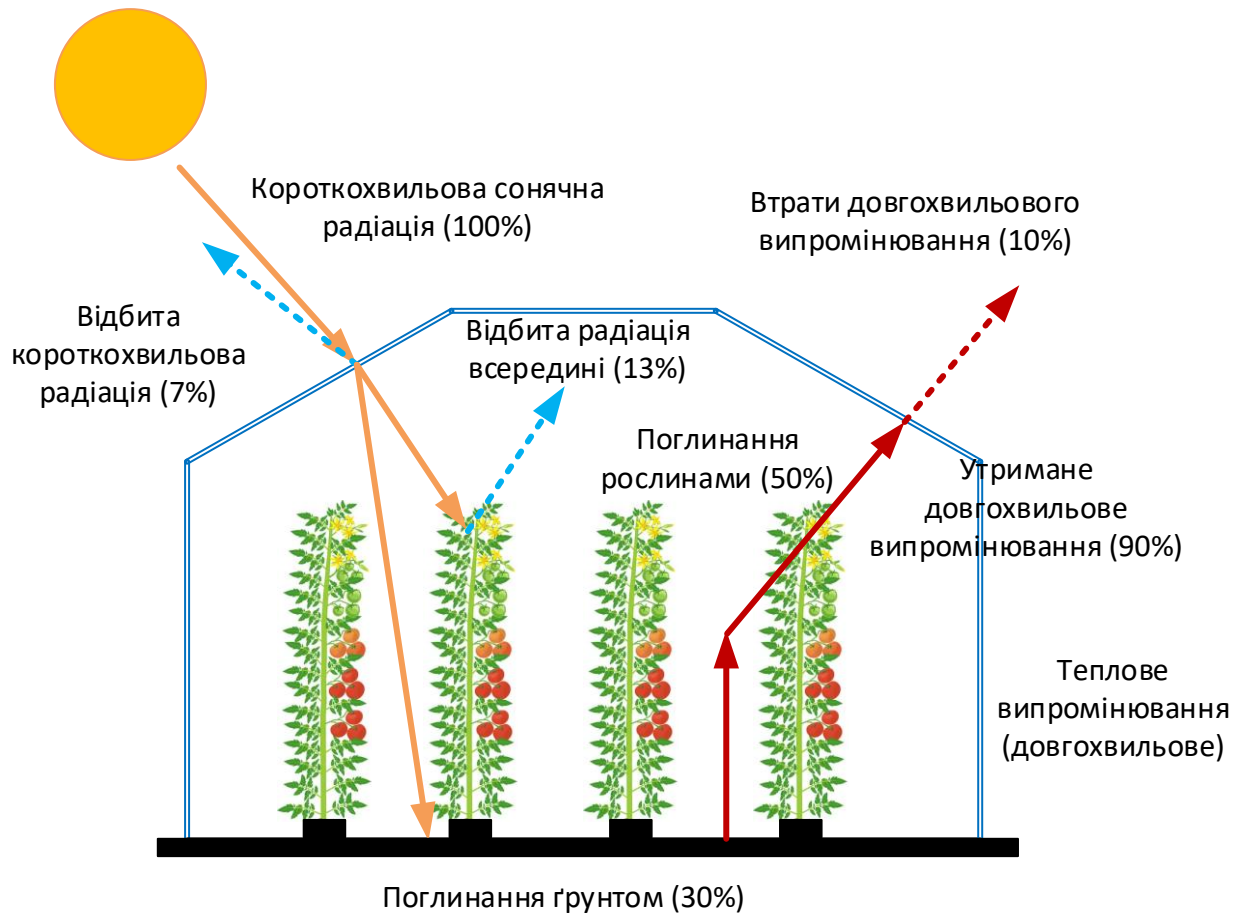


Рисунок 1.6 – Схема розподілу потоків сонячної радіації та теплового випромінювання у теплиці

Зовнішня температура повітря визначає базовий рівень теплових втрат теплиці шляхом конвекції та кондукції крізь огорожувальні поверхні. Різниця між внутрішньою та зовнішньою температурами створює постійний тепловий потік, спрямований назовні в холодну пору року, що вимагає безперервної роботи контуру опалення. Особливу складність для автоматики становлять весняно-осінні періоди, коли протягом доби спостерігаються значні температурні амплітуди, а швидка зміна хмарності викликає різкі теплові збурення. Висока динамічність цих процесів у поєднанні з тепловою інерцією опалювальних приладів та значним об'ємом повітря всередині споруди створює значне транспортне запізнення в каналі керування температурою [6].

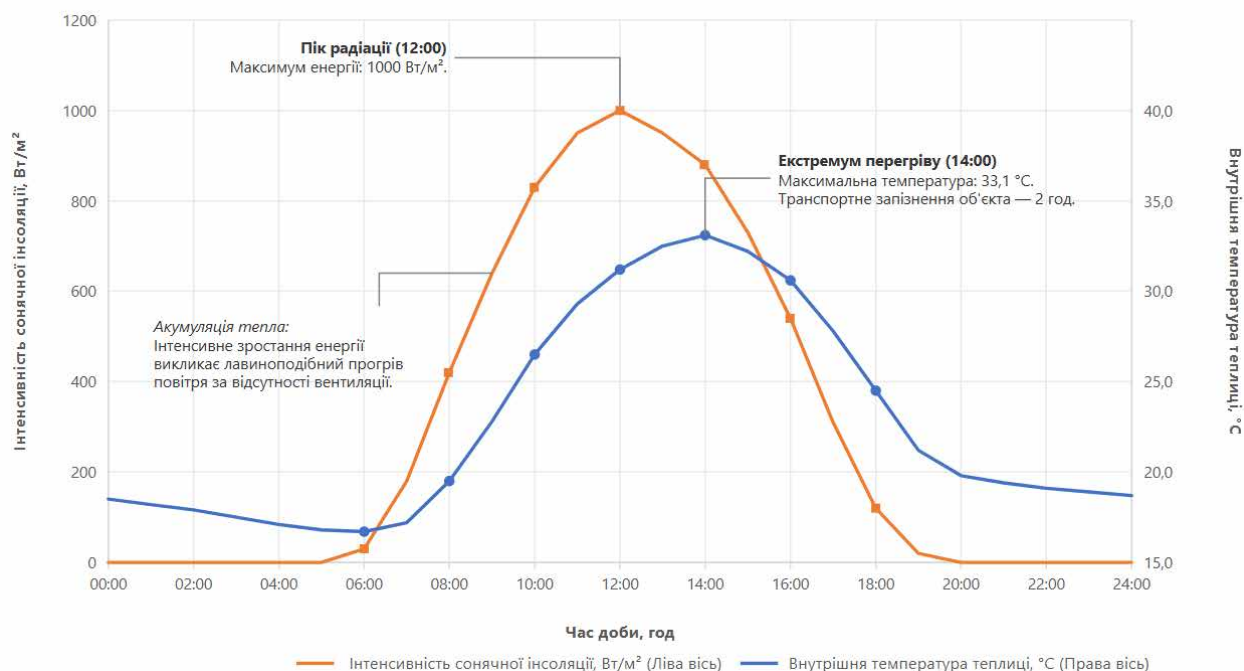


Рисунок 1.7 – Графік добового ходу інтенсивності сонячної інсоляції та викликаних нею коливань внутрішньої температури теплиці за відсутності автоматичного регулювання

Вітрове навантаження суттєво інтенсифікує процеси тепломасообміну між теплицею та навколишнім простором. Підвищення швидкості вітру призводить до збільшення коефіцієнта автовіддачі тепла від зовнішньої поверхні огороження, що різко підвищує загальні теплові втрати споруди. Крім того, вітер викликає динамічний тиск на конструкцію, внаслідок чого активізується інфільтрація, як неконтрольований обмін повітрям крізь щілини та нещільності стиків покриття [2]. За умов природної вентиляції через квартирки швидкість і напрямок вітру безпосередньо визначають кратність повітрообміну, перетворюючи цей процес із чисто керуючого на випадковий, глибоко збурений фактор, який здатний за кілька хвилин повністю порушити вологісний та температурний режими.

Атмосферні опади у вигляді дощу чи снігу створюють специфічні режими збурень для системи автоматизації. Дощ викликає різке охолодження скляного або плівкового покриття за рахунок високої теплоємності води та

поглинання тепла на її випаровування з поверхні теплиці. Це може призвести до раптового падіння температури всередині споруди навіть за стабільної роботи системи опалення. Сніговий покрив, у свою чергу, не лише створює небезпечне механічне навантаження на каркас, а й різко знижує коефіцієнт світлопропускання огорожі, що обмежує природний фотосинтез і вимагає активації систем штучного досвічування та контурів підлоткового танення снігу [5]. Таким чином, розробка системи автоматичного керування мікрокліматом повинна базуватися на випереджальному врахуванні всього комплексу зовнішніх кліматичних факторів для превентивної компенсації їхнього дестабілізуючого впливу.

1.4. Аналіз каналів керування: керовані, контрольовані та некеровані змінні об'єкта.

Детальний аналіз внутрішньої структури теплиці як складного багатозв'язного об'єкта автоматизації передбачає чітку класифікацію технологічних параметрів за їхньою роллю у загальному контурі регулювання мікроклімату. Специфіка біотехнічного об'єкта полягає у щільному переплетенні фізичних процесів тепломасообміну з фізіологічними реакціями рослинного ценозу, що зумовлює наявність значної кількості перехресних зв'язків. Для ефективного синтезу комп'ютерно-інтегрованої системи керування всі змінні процесу доцільно розподілити на три базові категорії, а саме: вихідні керовані змінні, вхідні керуючі впливи та зовнішні некеровані збурення [4]. Такий підхід дозволяє формалізувати топологію об'єкта та визначити оптимальні канали передачі керуючих сигналів для компенсації дестабілізуючих факторів.

Головними критеріями ефективності функціонування системи є вихідні контрольовані змінні, які безпосередньо характеризують стан внутрішнього середовища теплиці та визначають життєдіяльність фітоценозу. До цієї групи належать температура внутрішнього повітря, відносна або абсолютна вологість середовища, концентрація діоксиду вуглецю в підрослинному просторі, а

також температура кореневого субстрату. Оскільки рослинний масив чутливо реагує на коливання цих параметрів, автоматика повинна утримувати їх у межах вузьких технологічних регламентів, які змінюються залежно від фази вегетації та поточного рівня природної інсоляції [7]. Особливу складність для стабілізації становить взаємозв'язаність цих змінних, коли зміна одного параметра, температури через вентиляцію, автоматично викликає нелінійну зміну відносної вологості та концентрації вуглекислого газу (рис. 1.8).

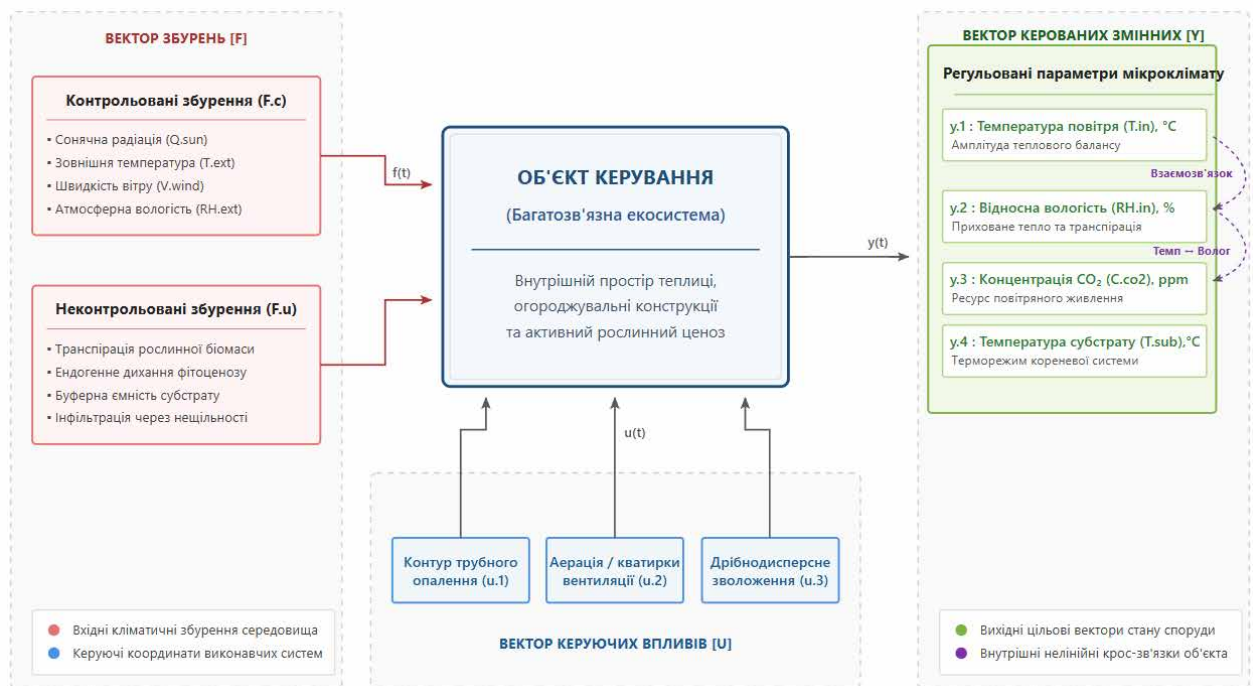


Рисунок 1.8 – Структурно-топологічна схема теплиці як багатозв'язного об'єкта автоматичного керування із зазначенням векторів вхідних, вихідних та збурюючих змінних

Для цілеспрямованого впливу на вихідні координати об'єкта система керування використовує керовані змінні, які формуються відповідними виконавчими механізмами інженерних підсистем. Основними каналами керування тут виступають витрата теплоносія в контурах трубного опалення, ступінь відкриття фрамуг природної вентиляції, продуктивність ліній штучного дощового або дрібнодисперсного зволоження, а також інтенсивність штучного світлодіодного чи натрієвого досвічування. Кожен із цих каналів володіє

унікальними динамічними властивостями, суттєвою тепловою або гідродинамічною інерцією, а також просторовим розподілом, що вимагає застосування специфічних законів регулювання. Автоматизоване комбінування цих впливів дозволяє підтримувати оптимальний баланс явного та прихованого тепла у просторі споруди [3].

Також є некеровані (збурюючі) змінні, які мають випадковий характер і діють на теплицю з боку навколишнього середовища. Оскільки заблокувати надходження цих збурень на фізичному рівні неможливо, завдання системи автоматизації зводиться до їхнього безперервного моніторингу та своєчасної випереджальної компенсації. До контрольованих збурень, які вимірюються метеорологічною станцією комплексу, відносять щільність потоку сонячної радіації, температуру зовнішнього повітря та швидкість вітру [4]. Водночас існують і неконтрольовані збурення, такі як коливання фізіологічної активності самих рослин, інтенсивність транспірації та виділення вологи ґрунтом, які не піддаються прямому інструментальному вимірюванню і мають оцінюватися непрямыми методами або за допомогою адаптивних спостережувачів стану.

Аналіз взаємодії між виділеними групами змінних дозволяє стверджувати, що теплиця є класичним прикладом об'єкта із перехресними зв'язками, де спроба стабілізувати одну змінну за допомогою окремого регулятора призводить до дестабілізації суміжних параметрів (рис. 1.9). Активація кватирок для зниження температури одночасно призводить до падіння вологості повітря та вимивання накопиченого вуглекислого газу, що негативно позначається на швидкості фотосинтезу [1-5]. Для подолання вказаної проблеми та забезпечення високої точності регулювання у сучасних комп'ютерно-інтегрованих системах захищеного ґрунту переходять від ізольованих контурів до систем багатозв'язного або предиктивного керування, які здатні розраховувати сукупний вектор керуючих дій на основі повної математичної моделі взаємодії всіх каналів об'єкта.

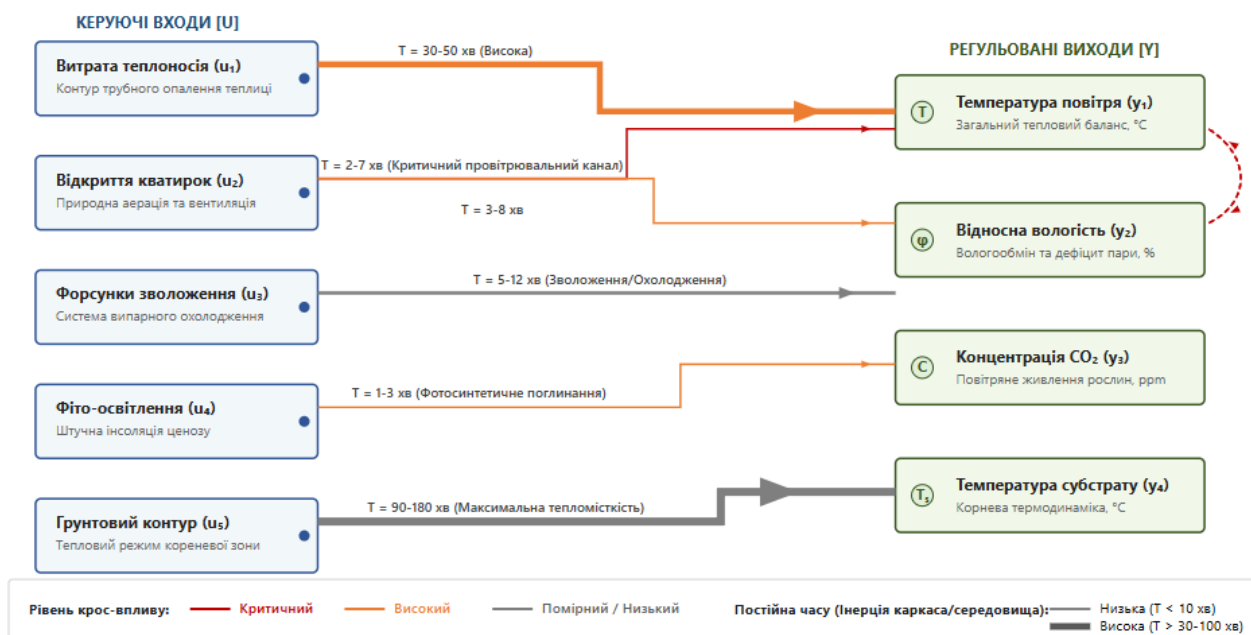


Рисунок 1.9 – Структура динамічних каналів зв'язку в теплиці

1.5. Огляд існуючих технічних рішень з автоматизації теплиць та аналіз їх недоліків.

Сучасний стан розвитку агропромислового комплексу захищеного ґрунту характеризується широким спектром апаратних та програмних засобів, спрямованих на підтримку параметрів штучного мікроклімату. Ринок автоматизації пропонує різноманітні рішення, починаючи від найпростіших локальних засобів релейного типу і закінчуючи масштабними комп'ютерно-інтегрованими комплексами на базі промислових контролерів та хмарних технологій [1]. Проте впровадження більшості наявних систем на практиці супроводжується низкою техніко-економічних та експлуатаційних проблем, пов'язаних із невідповідністю алгоритмічної бази реальним динамічним властивостям теплиць. Глибокий критичний аналіз існуючих рішень є обов'язковою умовою для формування вимог до проектованої системи багатозв'язного предиктивного керування.

Найбільш поширеними у фермерських та середніх господарствах є локальні системи автоматизації початкового рівня, побудовані на базі програмованих реле або недорогих мікроконтролерів загального призначення. Такі пристрої зазвичай функціонують за жорсткими пороговими алгоритмами,

які здійснюють увімкнення або вимкнення виконавчих механізмів при досягненні певних меж температури чи вологості. Основним недоліком подібного підходу є виникнення тривалих автоколивань у контурах регулювання через неврахування інерційності тепломасообмінних процесів. Постійне спрацьовування магнітних пускачів та приводів кватирок у такому режимі призводить до прискореного механічного зносу обладнання, а відсутність зв'язку між окремими локальними пристроями унеможливорює координацію дій при одночасній зміні кількох взаємопов'язаних параметрів.

Таблиця 1.2 – Порівняльний техніко-економічний аналіз систем автоматизації теплиць

Ієрархічний рівень та тип системи автоматизації	Показники технічної гнучкості та масштабованості	Капітальні та експлуатаційні витрати (Вартість)	Потенціал енергоефективності та оптимізації ресурсів	Обмеження алгоритмічного та апаратного забезпечення
Низький рівень: Локальні пристрої на базі програмованих реле та порогових терморегуляторів	Гнучкість практично відсутня. Система жорстко прив'язана до одного робочого алгоритму, а масштабування потребує повного фізичного перепроектування і переконфигурації штирів керування.	Екстремально низька початкова вартість обладнання та монтажу. Експлуатаційні витрати мінімальні й обмежуються періодичною заміною найпростіших релеїних компонентів.	Нульовий або від'ємний рівень енергозбереження. Порогові алгоритми викликають постійні автоколивання виконавчих механізмів, що призводить до перевитрати теплоносія та електроенергії.	Повна відсутність зв'язку між контурами. Системи не здатні враховувати динамічні метеорологічні збурення, що зумовлює низьку точність утримання цільових параметрів.
Середній рівень: Системи моніторингу на базі платформ Arduino, ESP32 або Raspberry Pi (IoT-рішення)	Висока концептуальна гнучкість завдяки відкритому коду. Дозволяє легко додавати нові бездротові сенсори, проте промислова надійність таких рішень залишається на низькому рівні.	Низька вартість апаратних засобів та компонентів. Водночас експлуатаційні витрати можуть зростати через необхідність постійного програмного супроводу та адміністрування.	Помірний потенціал. Дозволяє реалізувати гнучкі графіки роботи за часом, але відсутність точних математичних моделей об'єкта обмежує реальну економію паливно-енергетичних ресурсів.	Низька завадостійкість бездротових каналів зв'язку в умовах екстремальної вологості теплиць. Обмежені обчислювальні потужності для запуску важких предиктивних алгоритмів.
Високий рівень: Промислові кліматичні комп'ютери іноземного виробництва (Sercom, Privia, Hortinax)	Модульна структура забезпечує високу масштабованість у межах екосистеми виробника. Проте гнучкість обмежена абсолютно закритим програмним кодом.	Екстремально висока вартість ліцензій, обладнання та шеф-монтажу. Сервісне обслуговування вимагає постійних валютних витрат на залучення вузькоспеціалізованих іноземних інженерів.	Високий рівень енергоефективності. Забезпечується за рахунок комплексного обліку поточної сонячної інсоляції, використання температурних інтегралів та інтеграції з професійними метеостанціями.	Жорстка прив'язка до статичних коефіцієнтів регулювання, які розраховані на абстрактні європейські умови та не адаптуються до природного старіння конструкцій чи фітоценозу в процесі вегетації.

На великих промислових тепличних комбінатах стандартом де-факто стало використання спеціалізованих кліматичних комп'ютерів від провідних світових виробників. Серед розмаїття комерційних платформ особливе місце посідає нідерландський комплекс SKOV-SERCOM, архітектура якого базується на концепції централізованого керування з використанням спеціалізованих периферійних інтерфейсних карток [7]. Головною особливістю

цієї системи є застосування алгоритмів, що орієнтовані на оптимізацію витрат енергоресурсів шляхом інтеграції даних від власної метеостанції. Проте жорстка фокусованість SKOV-SERCOM на класичних телекомунікаційних лініях зв'язку та специфічній внутрішній архітектурі суттєво ускладнює її інтеграцію з сучасними бездротовими технологіями та сенсорами сторонніх розробників. Крім того, інтерфейс користувача та логіка конфігурування системи залишаються доволі консервативними, що вимагає тривалого навчання обслуговуючого персоналу.

Головними ринковими конкурентами згаданої платформи виступають кліматичні комп'ютери Priva та Hortimax Pro від Ridder, які також представляють голландську школу автоматизації захищеного ґрунту [8, 9]. Система Priva відрізняється глибокою інтеграцією всіх процесів життєзабезпечення споруди в єдину програмну оболонку, що дозволяє реалізувати складні графіки температурної стратегії залежно від накопиченої рослинами сонячної радіації. У свою чергу, Hortimax Pro від Ridder робить ставку на модульність та високу точність керування вузлами приготування поживних розчинів для гідропоніки. Попри високу інженерну досконалість, усім цим флагманським брендам притаманний спільний критичний недолік, який полягає в екстремально високій вартості ліцензійного програмного забезпечення та абсолютно закритій архітектурі. Будь-яка спроба модернізувати алгоритм або підключити нестандартний виконавчий механізм вимагає дороговартісного залучення сертифікованих іноземних інженерів.

Аналіз експлуатації закордонних кліматичних комп'ютерів у специфічних кліматичних зонах України виявляє суттєві недоліки суто алгоритмічного характеру. Більшість стандартних комерційних програм, включаючи базові версії SKOV-SERCOM, використовує статичні коефіцієнти налаштування регуляторів, які розраховані на усереднені параметри огорожувальних конструкцій та фітоценозу (рис. 1.10). Оскільки теплиця є об'єктом із нестаціонарними параметрами, які кардинально змінюються залежно від сезону року, віку рослин та площі листової поверхні, статичні

налаштування втрачають свою оптимальність вже через кілька місяців вегетації. Це призводить до виникнення значних динамічних похибок регулювання в періоди різкої зміни зовнішніх метеорологічних умов та супроводжується невиправданим перевитрачанням теплової та електричної енергії.

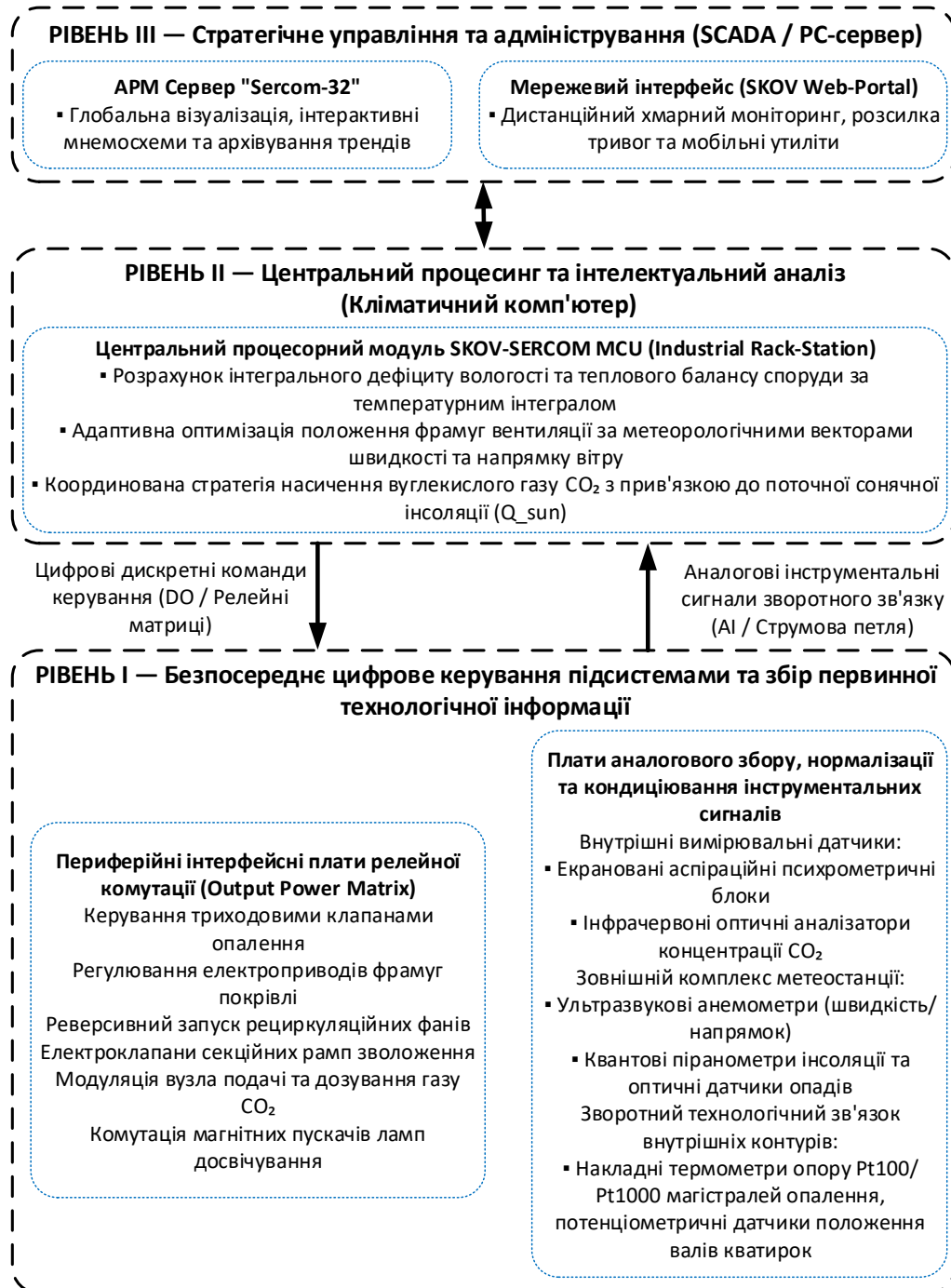


Рисунок 1.10 – Функціонально-ієрархічна схема типового промислового кліматичного комп'ютера SKOV-SERCOM із виділенням рівнів збору даних та безпосереднього цифрового керування підсистемами

Окремим перспективним напрямком є новітні розробки в галузі бездротових сенсорних мереж та концепції «Інтернету речей», які інтегруються з хмарними сервісами обробки інформації. Такі системи дозволяють розгортати гнучкі розподілені системи моніторингу без необхідності прокладання значної кількості кабельних трас, що значно знижує капітальні витрати на монтаж. Головні недоліки хмарних рішень автоматизації концентруються навколо низької завадостійкості бездротових каналів зв'язку в умовах високої вологості теплиць, обмеженого ресурсу автономних джерел живлення сенсорних вузлів та критичної залежності контурів керування від стабільності інтернет-з'єднання. Крім того, наявні хмарні платформи переважно виконують функції віддаленого моніторингу та збору статистики, не пропонуючи ефективних інструментів для вирішення завдань багатозв'язного предиктивного регулювання.

Таким чином, проведений огляд існуючих технічних рішень свідчить про наявність суттєвого технологічного розриву між дешевими, але функціонально обмеженими локальними пристроями, та потужними, проте фінансово недоступними і закритими закордонними комерційними системами типу SKOV-SERCOM чи Priva. Жодна з розглянутих категорій обладнання у базовій комплектації не вирішує проблему динамічної декуплізації перехресних зв'язків мікроклімату на основі превентивного аналізу метеорологічних збурень. Це підтверджує наукову актуальність та практичну доцільність розробки відкритої комп'ютерно-інтегрованої системи керування, яка б поєднувала доступну апаратну базу, алгоритми адаптації до змінних параметрів об'єкта та математичні моделі випереджальної компенсації зовнішніх дестабілізуючих впливів.

1.6. Обґрунтування доцільності впровадження комп'ютерно-інтегрованої системи.

Результати проведеного критичного аналізу наявного апаратного та програмного забезпечення чітко вказують на необхідність розробки

принципово нового підходу до автоматизації культиваційних споруд захищеного ґрунту. Традиційні локальні регулятори та комерційні закриті системи не спроможні повною мірою вирішити проблему мінімізації енергетичних витрат в умовах динамічних і нелінійних крос-зв'язків об'єкта. Створення та практичне розгортання комп'ютерно-інтегрованої системи (KIC) керування на базі відкритої архітектури промислових контролерів є науково обґрунтованим кроком, який дозволяє подолати технологічний розрив між низькою функціональністю бюджетних пристроїв та надмірною ціною імпортованих аналогів [4]. Таке рішення забезпечує якісно новий рівень гнучкості, завадостійкості та точності підтримки параметрів життєдіяльності фітоценозу.

Техніко-економічна доцільність інтеграції такої системи полягає у переході від ізольованого керування окремими контурами до комплексного моделювання поведінки всього об'єкта. Завдяки впровадженню сучасних мікропроцесорних засобів з'являється можливість реалізувати алгоритми випереджальної компенсації зовнішніх метеорологічних збурень, що реєструються локальною цифровою метеостанцією [10] (рис. 1.11). На відміну від класичних рішень, спроектована система здатна заздалегідь розраховувати необхідну потужність опалювального контуру ще до того, як раптове падіння зовнішньої температури чи посилення вітру яке викликає охолодження внутрішнього простору теплиці. Це мінімізує явища динамічного перерегулювання та автоколивань, які є головною причиною перевитрати паливно-енергетичних ресурсів у сучасних господарствах.

Важливим чинником на користь впровадження пропонованого рішення є оптимізація біологічного потенціалу рослинного масиву. Комп'ютерно-інтегроване середовище дозволяє гнучко пов'язати режими штучного освітлення, дозування вуглекислого газу та температурну стратегію в єдиний цілісний технологічний регламент, підпорядкований добовій динаміці сонячної радіації [8]. Забезпечення синергетичної взаємодії між усіма виконавчими механізмами унеможливорює виникнення ситуацій, коли одночасно активуються протилежні за фізичним змістом процеси, наприклад,

кондиціювання повітря через відкриття фрамуг та інтенсивне трубне опалення. Відповідно, стабілізація мікроклімату у вузьких оптимальних межах вегетації безпосередньо впливає на підвищення врожайності та зниження собівартості кінцевої аграрної продукції.

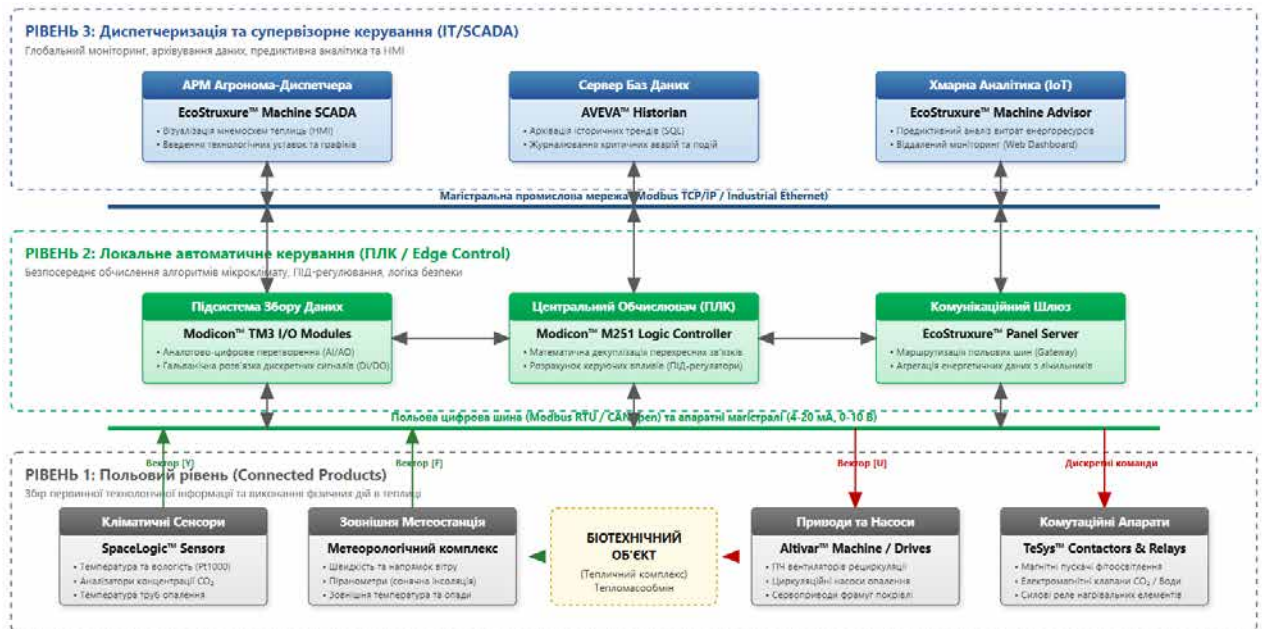


Рисунок 1.1 – Структурна схема інформаційних потоків та ієрархічних рівнів КІС керування мікрокліматом (на базі комплексу технічних засобів Schneider Electric)

Експлуатаційна доцільність розробки базується на використанні відкритих промислових протоколів обміну даними та модульного принципу побудови архітектури. Це усуває проблему залежності підприємства від іноземних постачальників ліцензійного програмного забезпечення та спеціалізованого сервісного інструментарію, що є критично важливим для вітчизняного сектору захищеного ґрунту [1-2]. Модульна структура дозволяє нарощувати обчислювальні потужності системи, підключати додаткові бездротові сенсорні мережі для контролю просторової неоднорідності полів температур та інтегрувати локальні контури керування з глобальними SCADA-системами верхнього рівня або хмарними сервісами віддаленого адміністрування та візуалізації.

Таблиця 1.3 – Прогнозні показники підвищення енергоефективності та зниження експлуатаційних витрат після впровадження КІС

№ з/п	Найменування показника / Стаття витрат	Базовий варіант	Прогнозний варіант (з КІС)	Абсолютна зміна (+/-)	Відносна зміна (%)	Очікуваний технологічний ефект та джерела економії
1. Енергетичні показники						
1.	Витрати природного газу на опалення, тис. м ³ /рік	1250	1025	-225	-18,00%	Завдяки предиктивному обчисленню теплового балансу, врахуванню метеопрогнозу (інсоляції, вітру) та усуненню перегрівів
2.	Споживання електроенергії (загальне), тис. кВт·год/рік	680	578	-102	-15,00%	Впровадження частотно-регульованих приводів (ЧРП) для вентиляторів/насосів, інтелектуальні графіки фіто-освітлення
3	Витрати на технологічне дозування CO ₂ , тонн/рік	140	119	-21	-15,00%	Оптимізація подачі вуглекислого газу залежно від рівня фотосинтезу (інсоляції) та положення вентиляційних фрамуг
2. Експлуатаційні та технологічні витрати						
1	Витрати на технічне обслуговування та ремонт (ТОР), тис. грн/рік	180	135	-45	-25,00%	Впровадження модулів діагностики обладнання, зменшення пускових струмів та механічного зносу запірної арматури
2	Витрати води на технологічні потреби (зволоження), м ³ /рік	4200	3654	-546	-13,00%	Точне ПІД-регулювання відносної вологості повітря та інтегрального дефіциту вологості без перезволоження середовища
3	Збитки від технологічного браку / відхилень мікроклімату, тис. грн/рік	350	70	-280	-80,00%	Мінімізація впливу людського фактора, автоматичне блокування аварійних режимів, усунення критичних температурних стресів
3. Інтегральні техніко-економічні показники						
1	Загальні річні експлуатаційні витрати на систему, тис. грн/рік	8450	6929	-1521	-18,00%	Сумарний прямий економічний ефект від комплексної оптимізації використання ресурсів та автоматизації процесів
2	Питомі енерговитрати на одиницю готової продукції, кВт·год/кг	4,2	3,36	-0,84	-20,00%	Скорочення споживання паливно-енергетичних ресурсів на тлі прогнозованого зростання продуктивності об'єкта на 5-7%

Впровадження комп'ютерно-інтегрованої системи (КІС) автоматичного

керування є повністю виправданим як із технічного, так і з економічного погляду. Системна інтеграція сучасних методів ідентифікації станів та предиктивних алгоритмів дозволяє трансформувати теплицю з пасивного об'єкта, що зазнає постійних дестабілізуючих впливів навколишнього середовища, в керований та енергоефективний біотехнічний комплекс. Очікуваний ефект від впровадження полягає у суттєвому скороченні споживання природного газу та електричної енергії на опалення і вентиляцію, зниженні питомих витрат на технічне обслуговування виконавчих механізмів та забезпеченні стабільно високої якості вирощуваної продукції незалежно від сезонних коливань метеорологічних факторів.

РОЗДІЛ 2.

МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ДИНАМІКИ МІКРОКЛІМАТУ ТЕПЛИЦІ

2.1. Фізична постановка задачі та обґрунтування переходу до моделі із зосередженими параметрами.

Функціонування сучасного промислового тепличного комплексу підпорядковується закономірностям багатовимірних нелінійних термодинамічних процесів, просторова розподіленість яких суттєво ускладнює завдання автоматизації. У реальних умовах експлуатації ключові показники внутрішнього мікроклімату, такі як температура повітряного середовища, його абсолютний вологовміст та температурне поле шару ґрунту, виступають функціями просторових координат (x, y, z) і часу t [1-2]. Повний математичний опис такого об'єкта вимагає спільного розв'язання системи диференціальних рівнянь у частинних похідних, що базуються на законах теплопровідності Фур'є, конвективного масопереносу Кірхгофа та дифузії вологи Фіка. Динаміку системи додатково ускладнює інтерференція різнорідних збурень та керуючих впливів, серед яких визначальними є добові флуктуації сонячної інсоляції, теплова потужність повітряних калориферів, енергія заглиблених нагрівальних елементів субстрату, а також інтенсивність вологовиділення внаслідок евапотранспірації.

Попри високу теоретичну точність моделей у частинних похідних, їх безпосереднє використання для аналітичного дослідження перехідних процесів та синтезу алгоритмів цифрового керування в реальному часі на базі мікропроцесорних контролерів є практично неможливим через надмірну обчислювальну складність і невизначеність граничних умов [2]. З метою адаптації математичного апарату до прикладних інженерних задач доцільно перейти від нескінченновимірної просторово-розподіленої системи до еквівалентної моделі із зосередженими параметрами шляхом просторового усереднення. Це дозволяє замінити локальні фізичні координати їх

інтегральними за об'ємом чи площею значеннями, трансформуючи вихідні рівняння у частинних похідних у систему звичайних диференціальних рівнянь першого порядку за часом.

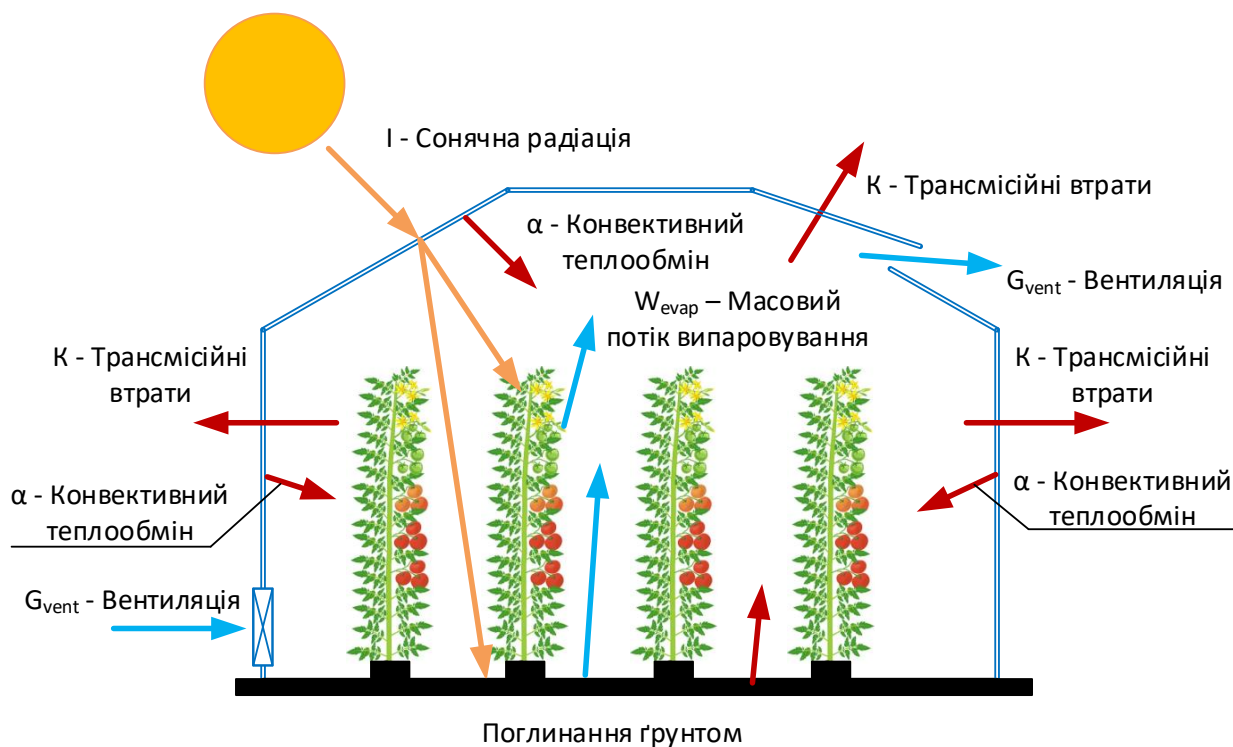


Рисунок 2.1 – Принципова схема тепло- та масообмінних потоків в теплиці

Зазначена процедура редукції вимірності об'єкта базується на низці фізично обґрунтованих теплотехнічних припущень щодо властивостей внутрішнього середовища культиваційної споруди. Припускається, що завдяки безперервній природній конвекції та примусовій циркуляції повітря за допомогою рециркуляційних вентиляторів весь повітряний об'єм теплиці V можна розглядати як зону ідеального та миттєвого перемішування, що дає право знехтувати градієнтами температури та вологості по висоті й площі будівлі й оперувати єдиними координатами $t(\tau)$ та $d(\tau)$. Аналогічно, робоча зона ґрунтового масиву площею f типізується як обмежений за глибиною термічно однорідний акумулятор тепла з усередненою температурою $\theta(\tau)$. Процеси зовнішнього теплообміну через світлопрозоре огороження площею

F , конвективного взаємозв'язку між субстратом і повітрям, а також випаровування вологи формалізуються за допомогою макроскопічних законів Ньютона-Ріхмана та Дальтона. Власна теплоємність рослинного покриву через її малість не виділяється в окрему динамічну ланку, проте фітоценоз розглядається як зосереджене джерело вологовиділення, що суттєво впливає на загальний баланс матеріальних потоків водяної пари в об'ємі.

Перехід від складної просторово-розподіленої термодинамічної системи до інженерної математичної моделі із зосередженими параметрами вимагає введення низки обґрунтованих фізико-математичних допущень, які дозволяють суттєво спростити аналітичний опис без критичної втрати точності. Перш за все, у розробленій моделі приймається гіпотеза повного та миттєвого перемішування внутрішнього повітряного середовища. Це означає цілеспрямоване нехтування будь-якими просторовими градієнтами термодинамічних координат по висоті та площі культиваційної споруди. Весь внутрішній об'єм теплиці розглядається як макроскопічно ізотропна зона, стан якої в будь-який момент часу однозначно описується усередненими значеннями температури та абсолютного вологовмісту повітря. Фізичним обґрунтуванням такого підходу є безперервна робота систем примусової рециркуляційної вентиляції у поєднанні з інтенсивними конвективними потоками, що швидко нівелюють локальні неоднорідності мікроклімату в робочій зоні.

Аналогічний підхід до просторового усереднення застосовується при моделюванні теплових процесів у субстраті. Едафічне середовище (грунтовий масив) типізується як обмежений за глибиною, термічно однорідний акумулятор енергії, що характеризується єдиною еквівалентною температурою. Правомірність цього допущення базується на тому факті, що добові коливання зовнішніх та внутрішніх теплових збурень експоненціально затухають і практично зникають на глибині понад 25...30 сантиметрів. Таким чином, основний теплоакумуючий ефект зосереджується виключно у верхньому кореневмісному шарі, що дозволяє розглядати його як зосереджену

теплоємність.

Для забезпечення можливості аналітичного розв'язання диференціальних рівнянь балансу та синтезу передатних функцій виконується лінеаризація коефіцієнтів тепломасообміну. Зокрема, інтенсивність конвективного теплообміну між поверхнею ґрунту та повітрям, а також коефіцієнти трансмісійних втрат енергії крізь світлопрозоре огороження приймаються квазісталими величинами. Таке спрощення є математично коректним, оскільки експлуатаційні режими закритого ґрунту обмежені відносно вузьким технологічним діапазоном температур (переважно від $+15\text{ }^{\circ}\text{C}$ до $+30\text{ }^{\circ}\text{C}$). У цих межах нелінійністю радіаційної складової теплопередачі можна знехтувати, успішно замінивши її лінійними апроксимаціями без суттєвого спотворення загальної динаміки об'єкта.

Крім того, при формуванні структури математичної моделі цілеспрямовано знехтувано власною теплоємністю фітоценозу. Рослинна біомаса не виділяється в окремий інерційний термодинамічний контур, а розглядається виключно як безінерційне зосереджене джерело вологовиділення внаслідок безперервних процесів евапотранспірації. Це рішення зумовлене тим, що сумарна теплоємність самих рослин на один-два порядки нижча за енергетичну ємність масивних огорожувальних конструкцій, загального об'єму повітря та ґрунтового масиву. Впровадження наведеного комплексу фізико-технічних допущень дозволяє сформувати адекватну систему звичайних диференціальних рівнянь, похибка якої не перевищує інженерних норм і повністю задовольняє жорстким вимогам до проектування мікропроцесорних систем автоматичного керування.

2.2 Розширена система рівнянь тепловологого балансу із зосередженими параметрами.

Базуючись на раніше обґрунтованому комплексі фізико-технічних допущень, динамічні процеси в культиваційній споруді можна формалізувати у вигляді взаємопов'язаної системи звичайних диференціальних рівнянь. Така

редукована модель із зосередженими параметрами дає змогу сукупно досліджувати теплообмінні та вологообмінні явища, які протікають у повітряному об'ємі та верхньому шарі субстрату під впливом керуючих і збуджуючих факторів [1-4]. Математичне ядро макроскопічного балансу енергії для твердої фази середовища визначається швидкістю накопичення тепла в кореневмісному шарі, що описується наступною залежністю:

$$m_{gr}c_{gr}\frac{d\theta}{d\tau} = If + P_{gr} - \alpha f(\theta - t) - rW_{evap}. \quad (2.1)$$

У наведеному виразі змінна θ позначає еквівалентну температуру робочого шару ґрунту, тоді як параметри m_{gr} та c_{gr} відображають відповідно його ефективну масу та питому теплоємність. Ліва частина рівняння характеризує швидкість зміни внутрішньої енергії субстрату в часі τ . Енергетичне підживлення системи забезпечується за рахунок двох основних джерел, першим з яких є результуючий потік сонячної радіації I , поглинутий поверхнею площею f , а другим штучний підігрів із регульованою потужністю P_{gr} , що реалізується за допомогою водяних нагрівачів [2]. Процеси розсіювання та перерозподілу енергії враховують конвективну віддачу тепла у внутрішній об'єм повітря із коефіцієнтом теплопередачі α при поточному температурному стані повітря t . Суттєвою особливістю розширеної моделі є введення останнього члена, який визначає витрату теплоти на фазовий перехід вологи з поверхні ґрунту, де константа r відповідає питомій теплоті пароутворення, що становить приблизно $2.5 \cdot 10^6$ Дж/кг, а змінна W_{evap} задає сумарну масову витрату випаровуваної речовини.

Динаміка теплових станів повітряної підсистеми теплиці є безпосередньо зв'язаною із термодинамікою субстрату та зовнішнім метеорологічним оточенням. Зміна ентальпії газового об'єму підпорядковується закону збереження енергії для зосередженої маси повітря m_n із питомою теплоємністю c_p , що записується у вигляді диференціального рівняння:

$$m_n c_p \frac{dt}{d\tau} = P_n + \alpha f(\theta - t) - kF(t - t_z) - G_{vent} c_p (t - t_z). \quad (2.2)$$

У цьому випадку інтенсивність зміни температури внутрішнього повітряного об'єму t залежить від поточної потужності повітряних калориферів P_n та конвективного припливу тепла від нагрітого ґрунту. Втрати енергії в навколишнє середовище відбуваються за двома паралельними каналами. Трансмісійний складник визначається теплопередачею крізь світлопрозору захисну оболонку площею F із коефіцієнтом тепловтрат k та залежить від різниці між температурою повітря в теплиці та температурою зовнішнього атмосферного повітря t_z . Другий канал втрат тепла зумовлений конвективним масообміном під час природної або примусової вентиляції, де величина G_{vent} позначає масову витрату повітря, що циркулює крізь відкриті фрамуги під час регулювання мікроклімату.

Окрім суто температурних коливань, важливим фактором життєдіяльності рослин є вологісний режим, математичний опис якого інтегрується в загальну систему через рівняння матеріального балансу водяної пари в закритому просторі споруди. Рівновага маси вологи в повітряному об'ємі визначається балансом між внутрішніми джерелами пароутворення та її винесенням за межі споруди:

$$m_n \frac{dd}{d\tau} = W_{evap} - G_{vent}(d - d_z). \quad (2.3)$$

Швидкість зміни абсолютного вологовмісту внутрішнього повітря $\frac{dd}{d\tau}$ прямо пропорційна інтенсивності випаровування W_{evap} і обмежена асиміляційною спроможністю вентиляційного потоку G_{vent} , який транспортує вологу назовні, враховуючи вологовміст атмосферного повітря d_z [3]. При цьому сам масовий потік випаровування вологи з поверхні субстрату W_{evap} не є сталою величиною, а виступає головною сполучною ланкою між тепловою та вологообмінною підсистемами. Його математичне представлення базується на законі Дальтона і визначається рушійною силою процесу різницею вологовмістів:

$$W_{evap} = \beta f(d_{sat}(\theta) - d). \quad (2.4)$$

У даній алгебраїчній залежності параметр β позначає еквівалентний

коефіцієнт масовіддачі, віднесений до одиниці корисної площі ґрунту, а функція $d_{sat}(\theta)$ відображає граничний вологовміст насиченого повітря безпосередньо біля випаровувальної поверхні, який є суттєво нелінійною функцією від температури субстрату.

Таким чином, представлена система рівнянь (2.1) – (2.4) утворює замкнену нелінійну систему диференціально-алгебраїчних рівнянь із зосередженими параметрами (рис. 2.2). Вона повністю враховує взаємний перехресний вплив температурних та вологісних полів, що дає змогу використовувати її для вирішення задач прогнозного моделювання та синтезу багатовхідних систем оптимального автоматичного керування мікрокліматом [4].

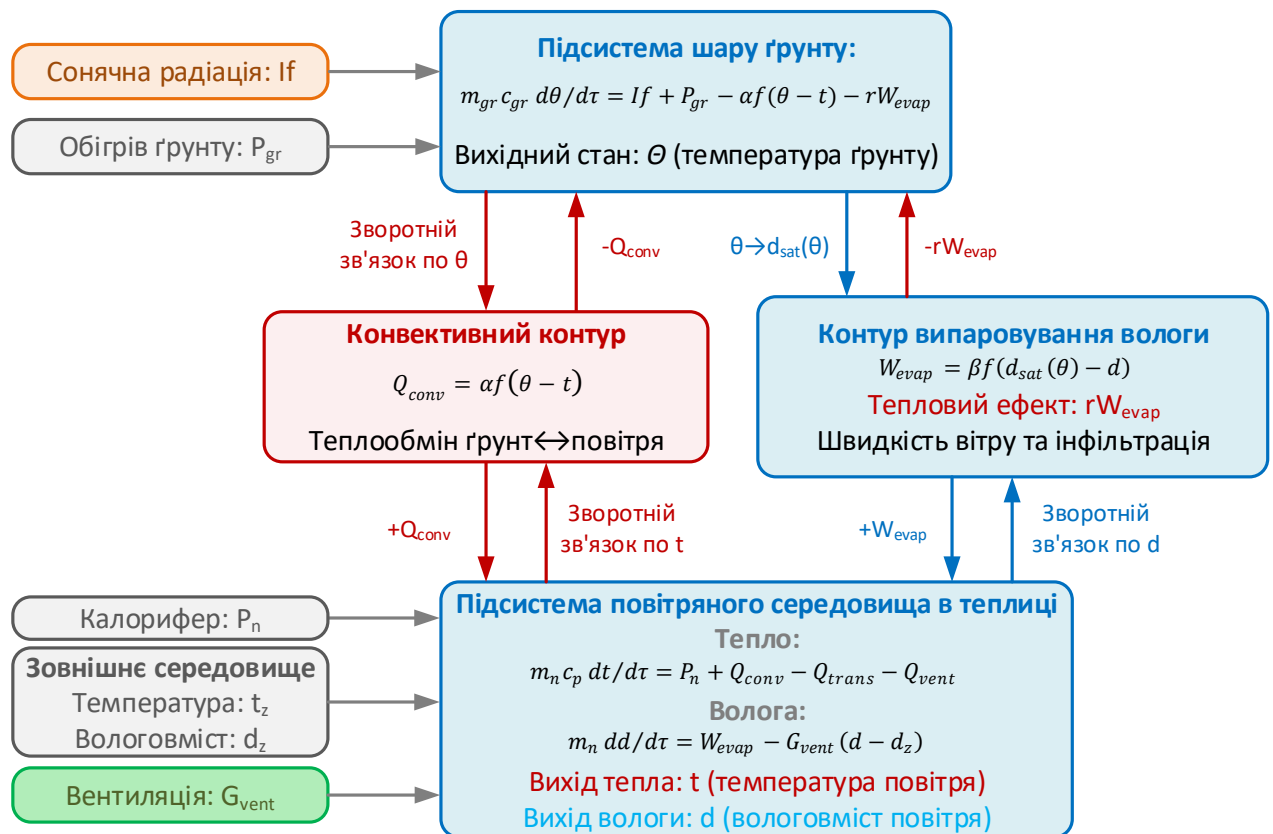


Рисунок 2.2 – Функціонально-структурна блок-схема взаємозв'язків між тепловими та вологими контурами енерговитрат у редукованій математичній моделі культивацийної споруди

Таблиця 2.2 – Номінальні значення теплофізичних, конструкційних та геометричних коефіцієнтів розширеної системи динамічних рівнянь балансу

Позначення	Найменування параметра	Числове значення	Одиниці вимірювання	Примітка / Джерело
f	Корисна площа поверхні ґрунту (субстрату)	1.0	м^2	Задані геометричні умови
F	Загальна площа світлопрозорого огороження	1.5	м^2	Задані геометричні умови
m_n	Ефективна маса внутрішнього повітряного середовища	0.868	кг	Розрахункове значення
m_{gr}	Маса активного (теплоакумуючого) шару ґрунту	360	кг	Задані умови об'єкта
c_p	Питома ізобарна теплоємність повітря	$1.05 \cdot 10^3$	$\text{Дж}/(\text{кг} \cdot ^\circ\text{C})$	Довідкові дані
c_{gr}	Питома теплоємність вологого ґрунту	$4 \cdot 10^3$	$\text{Дж}/(\text{кг} \cdot ^\circ\text{C})$	Довідкові дані
α	Коефіцієнт конвективної тепловіддачі від ґрунту до повітря	5.3	$\text{Вт}/(\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{C})$	Розрахункове значення
k	Зведений коефіцієнт трансмісійних тепловтрат огороження	5.95	$\text{Вт}/(\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{C})$	Розрахункове значення
r	Питома теплота пароутворення води (при $+20\text{ }^\circ\text{C}$)	$2.5 \cdot 10^6$	$\text{Дж}/\text{кг}$	Термодинамічна стала
β	Зведений коефіцієнт масовіддачі (випаровування)	$1.2 \cdot 10^{-3}$	$\text{кг}/(\text{м}^2 \cdot \text{с})$	Літературні дані [1]
I	Середня інтенсивність поглинутої сонячної радіації	50	$\text{Вт}/\text{м}^2$	Номінальне збурення
P_n	Номінальна теплова потужність повітряного калорифера	120	Вт	Робоча точка (статика)
P_{gr}	Номінальна теплова потужність підігріву ґрунту	120	Вт	Робоча точка (статика)
t_z	Розрахункова температура зовнішнього середовища (зима)	-10	$^\circ\text{C}$	Фіксоване збурення

2.3. Лінеаризація нелінійних зв'язків та формування узагальненої моделі.

Сформована система диференціальних рівнянь макроскопічного

тепловологісного балансу належить до класу суттєво нелінійних динамічних моделей. Головним джерелом цієї математичної складності виступає термодинамічна функціональна залежність максимального вологовмісту насиченого повітря від його поточного температурного стану [1-5]. У реальних фізичних процесах закритих культивацийних споруд здатність газового середовища утримувати водяну пару без утворення конденсату описується нелінійною експоненціальною кривою, що базується на емпіричних психрометричних рівняннях типу Магнуса-Тетенса. Наявність такої трансцендентної функції у системі диференціальних рівнянь унеможливорює безпосереднє застосування класичних методів операційного числення для знаходження аналітичного розв'язку та подальшого синтезу регуляторів. Відповідно, виникає об'єктивна необхідність зведення математичного опису до лінійного вигляду шляхом еквівалентних перетворень.

Для подолання вказаної проблеми застосовується метод локальної лінеаризації нелінійної функції вологовмісту в околі номінального режиму роботи теплиці. Процедура базується на розкладанні вихідної експоненціальної залежності в ступеневий ряд Тейлора з подальшим відкиданням нелінійних членів вищих порядків малосності [2]. Математично цей перехід для функції граничного вологовмісту залежно від температури внутрішнього повітряного середовища записується у вигляді лінійного наближення:

$$d_{sat}(t) \approx d_{sat}(t_0) + \gamma(t - t_0). \quad (2.5)$$

У даному рівнянні параметр γ являє собою температурний коефіцієнт вологоємності, який визначається як перша похідна від функції насичення за температурою повітря у заданій статичній робочій точці t_0 . Фізичний зміст цього коефіцієнта полягає у відображенні інтенсивності приросту здатності повітря поглинати вологу при зміні його температури на один градус у межах вузького технологічного діапазону. Графічна інтерпретація виконаного математичного спрощення наочно підтверджує правомірність застосованого інженерного підходу (рис. 2.3). У робочому діапазоні температур, який для типових тепличних комплексів становить від +18 °C до +25 °C, розбіжність між

дотичною прямою та реальною кривою вологовмісту є мінімальною і не перевищує допустимої похибки моделювання [1-2]. Така висока збіжність результатів у локальній зоні дає змогу повністю відмовитися від складних експоненціальних виразів під час розрахунку динаміки перехідних процесів.

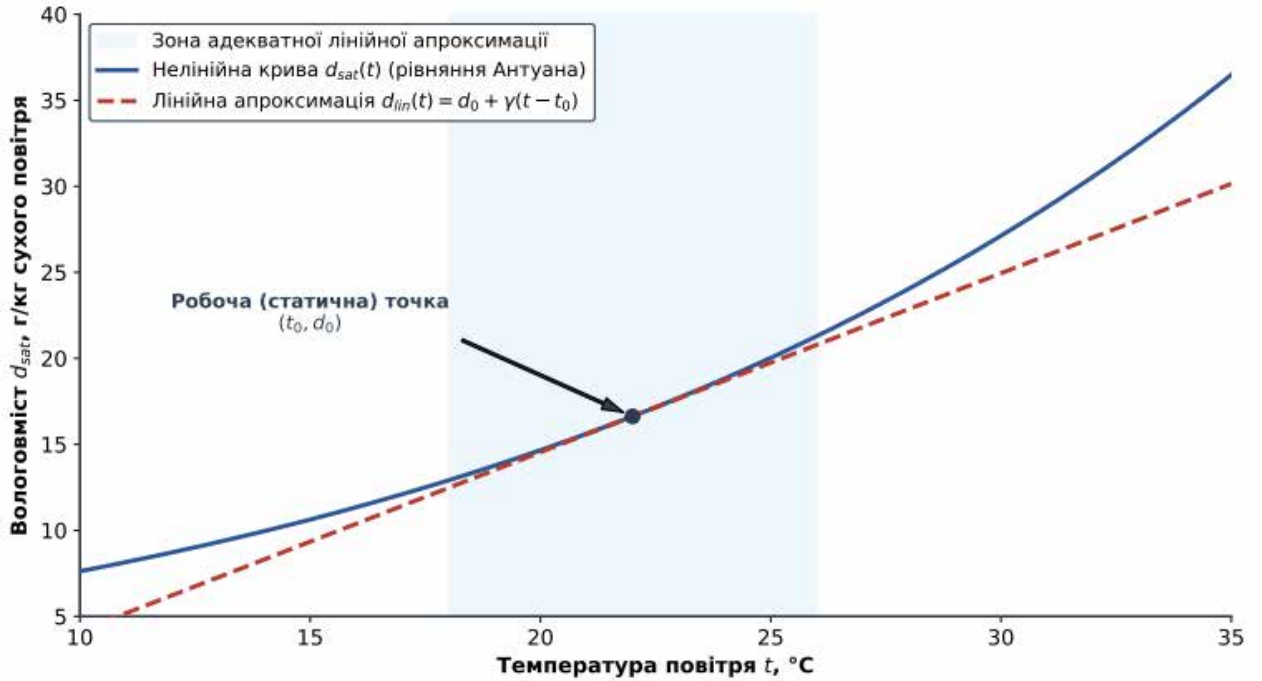


Рисунок 2.4 – Графічні залежності лінеаризації функції вологовмісту насиченого повітря від його температури

Використання лінеаризованого виразу в загальній системі диференціальних рівнянь дає змогу сформулювати остаточну узагальнену математичну модель:

$$\left\{ \begin{array}{l} m_{gr} c_{gr} \frac{d\Delta\theta}{d\tau} = -\alpha f \Delta\theta + (\alpha f - r\beta f \gamma) \Delta t + r\beta f \Delta d + \Delta P_{gr} + f \Delta I \\ m_n c_p \frac{d\Delta t}{d\tau} = \alpha f \Delta\theta - (\alpha f + kF + c_p G_{vent0}) \Delta t + \\ \quad + \Delta P_n + kF \Delta t_z - c_p (t_0 - t_{z0}) \Delta G_{vent} \\ m_n \frac{d\Delta d}{d\tau} = \beta f \gamma \Delta t - (\beta f + G_{vent0}) \Delta d - (d_0 - d_{z0}) \Delta G_{vent} + G_{vent0} \Delta d_z \end{array} \right. , (2.6)$$

де $\Delta t = t - t_0$ – відхилення температури повітря від заданої;

$\Delta\theta = \theta - \theta_0$ – відхилення температури ґрунту;

$\Delta d = d - d_0$ – відхилення вологовмісту;

$\Delta P_n = P_n - P_{n0}$ – зміна потужності калорифера відносно базової;

$$\Delta G_{vent} = G_{vent} - G_{vento} - \text{відхилення масових витрат повітря.}$$

Завдяки заміні нелінійного компонента на його лінійний еквівалент та переходу до змінних у відхиленнях, розширена система трансформується у класичну форму простору станів. Отриманий лінійний опис повною мірою враховує перехресні взаємозв'язки між тепловим станом повітряного контуру та інтенсивністю масообміну водяної пари, створюючи строгу аналітичну базу для подальшого визначення матриці передатних функцій об'єкта керування та параметричної оптимізації мікропроцесорних систем мікроклімату.

2.4. Аналітичний розв'язок узагальненої моделі.

Для виконання інженерного синтезу систем автоматичного керування та налаштування промислових регуляторів мікроклімату необхідно перейти від часової області диференціальних рівнянь до області комплексної змінної. Для цього застосовуємо інтегральне перетворення Лапласа до лінеаризованої системи за умови нульових початкових відхилень фазових координат [11]. Оскільки вихідна багатозв'язна математична модель третього порядку характеризується надмірною алгебраїчною складністю через наявність перехресних взаємозв'язків між фізичними контурами, безпосереднє отримання точних передатних функцій призводить до громіздких поліноміальних виразів. З метою спрощення узагальненої моделі та виділення головних каналів керування застосовується метод декомпозиції, який базується на нехтуванні слабкими зворотними зв'язками та поділі рухів на швидкі та повільні складові [12] (рис. 2.5).

Для каналу керування температурним режимом повітря «теплова потужність калорифера – температура внутрішнього повітря» розглядається ізольована динаміка повітряного об'єму за умови стабілізації інших параметрів. На основі отриманого раніше рівняння теплового балансу для газового середовища, операторна передатна функція цього каналу зводиться до типової аперіодичної ланки першого порядку:

$$W_t(s) = \frac{\Delta t(s)}{\Delta P_n(s)} = \frac{K_t}{T_t s + 1}. \quad (2.7)$$

Статичний коефіцієнт передачі об'єкта визначається сумарними тепловими втратами і становить:

$$K_t = (\alpha f + kF + c_p G_{vent0})^{-1}. \quad (2.8)$$

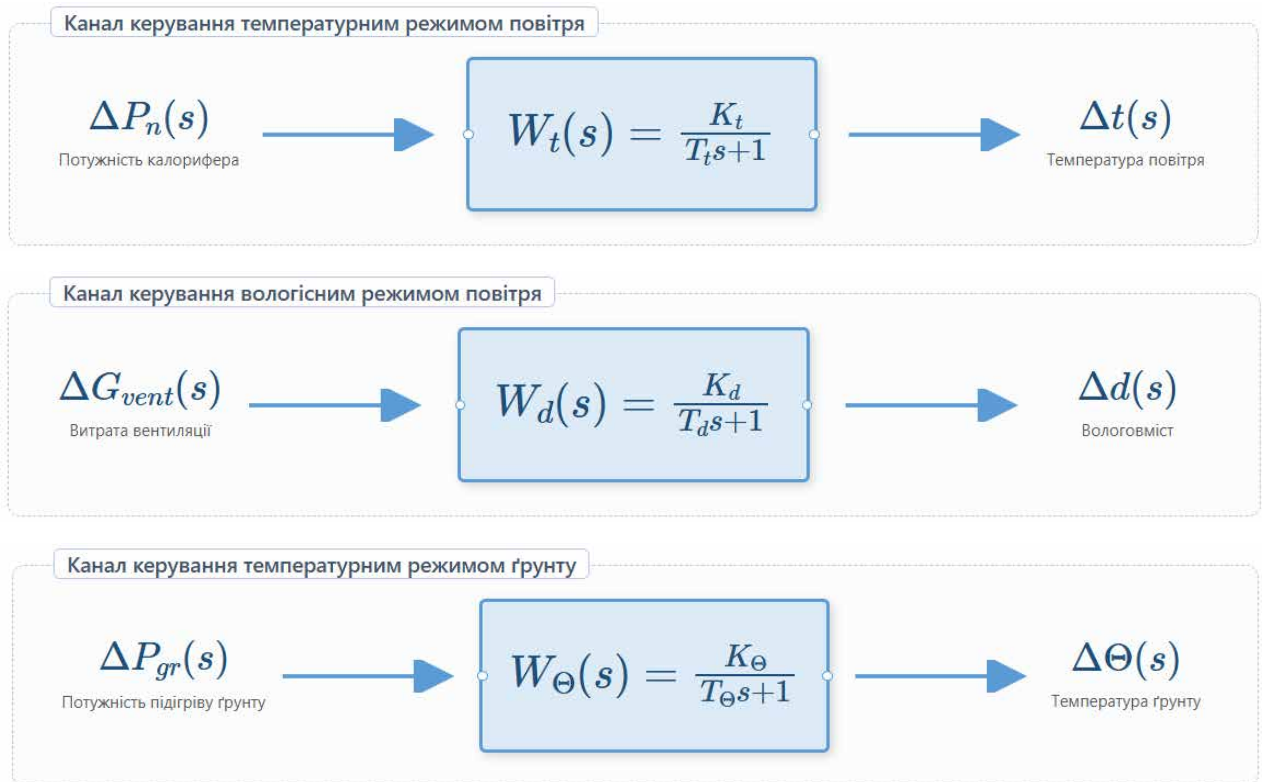


Рисунок 2.7 – Структурна схема спрощеної математичної моделі теплиці у вигляді набору ізольованих аперіодичних ланок за основними каналами керування

Стала часу повітряного контуру обчислюється як відношення ефективної теплоємності до втрат:

$$T_t = m_n c_p (\alpha f + kF + c_p G_{vent0})^{-1}. \quad (2.9)$$

Ці параметри кількісно відображають інерційність реакції середовища на роботу нагрівачів.

Аналогічний підхід застосовується для формалізації каналу керування вологісним режимом «втрата вентиляційного повітря – абсолютний вологовміст». Враховуючи рівняння матеріального балансу вологи, передатна функція за даним каналом також набуває вигляду інерційної ланки, що

апроксимує динаміку вологообміну:

$$W_d(s) = \frac{\Delta d(s)}{\Delta G_{vent}(s)} = \frac{K_d}{T_d s + 1}, \quad (2.10)$$

де $K_d = -\frac{d_0 - d_{z0}}{\beta f + G_{vento}}$ – коефіцієнт передачі;

$T_d = \frac{m_n}{\beta f + G_{vento}}$ – стала часу акумуляції вологи.

Для вологообмінного контуру динамічні параметри залежать від інтенсивності повітрообміну та випаровування, тобто при визначені коефіцієнта передачі знак мінус вказує на зворотну реакцію (збільшення вентиляції зменшує вологість за умови більш сухого зовнішнього повітря).

Формування передатної функції для глибоко інерційної підсистеми за каналом «теплова потужність підігріву ґрунту – температура ґрунту» здійснюється на базі першого диференціального рівняння системи. Приймаючи допущення про незалежність локального нагріву субстрату від швидких коливань температури повітря в короткостроковому періоді, математичний опис спрощується до вигляду:

$$W_\Theta(s) = \frac{\Delta \Theta(s)}{\Delta P_{gr}(s)} = \frac{K_\Theta}{T_\Theta s + 1}, \quad (2.11)$$

де $K_\Theta = \frac{1}{\alpha f}$ – коефіцієнт передачі ґрунтового масиву;

$T_\Theta = \frac{m_{gr} c_{gr}}{\alpha f}$ – стала часу.

Отримані аналітичні залежності підтверджують фундаментальні термодинамічні властивості об'єкта, розраховані на попередніх етапах. Стала часу T_Θ на кілька порядків перевищує часові константи повітряного T_t та вологісного T_d контурів, що математично обґрунтовує коректність застосованої декомпозиції.

По каналу регулювання температури повітря графік відображає реакцію внутрішнього повітряного об'єму на одиничний східчастий зсув теплової потужності калорифера (рис. 2.8). Процес має чітко виражений аперіодичний характер першого порядку з відносно високою швидкодією (стала часу становить 320 секунд), що зумовлено низькою тепловою інерцією повітряної

маси порівняно з конструктивними елементами споруди.

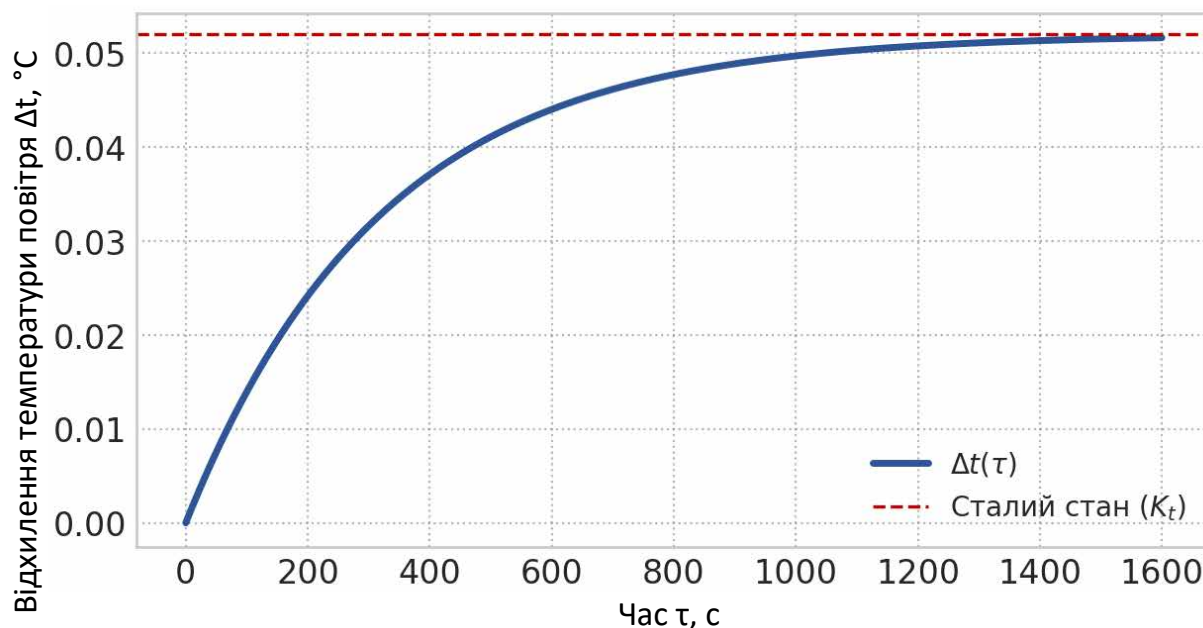


Рисунок 2.8 – Перехідний процес за каналом «потужність калорифера – температура повітря»

Динамічна характеристика контуру вологообміну при зміні витрати вентиляційного повітря демонструє від'ємний статичний коефіцієнт передачі (рис. 2.9). Це свідчить про те, що інтенсифікація повітрообміну призводить до асиміляції та винесення вологи за межі споруди. Контур володіє найменшою інерційністю серед усіх каналів (стала часу 140 секунд).

Перехідна функція каналу підігріву субстрату характеризується екстремально високою тепловою інерційністю. З огляду на значну акумулюючу здатність та масу ґрунту, процес стабілізації температурного поля триває десятками годин (стала часу становить 18400 секунд, тобто понад 5 годин). Через це вісь часу наведено у годинах для забезпечення належної інформативності та візуальної чіткості графіка.

Отримані передатні функції формують повноцінну теоретичну базу для вибору типів та параметричного синтезу локальних мікропроцесорних регуляторів мікроклімату культивацийної споруди (табл. 2.5).

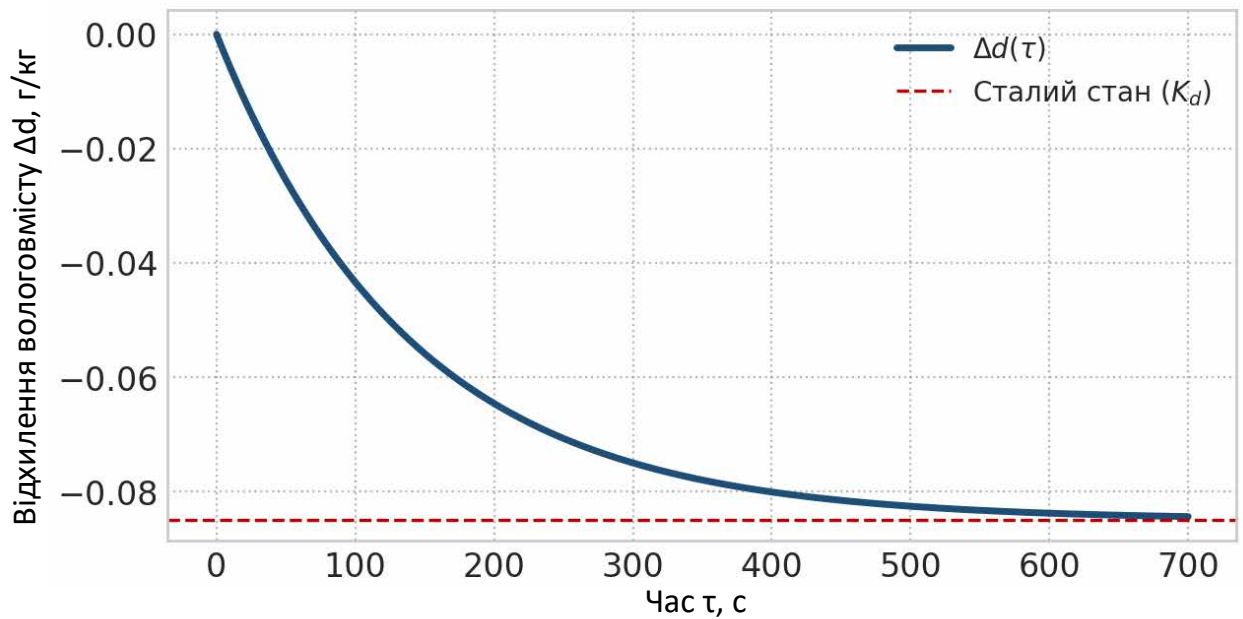


Рисунок 2.9 – Перехідний процес за каналом «витрата вентиляції – вологовміст повітря»

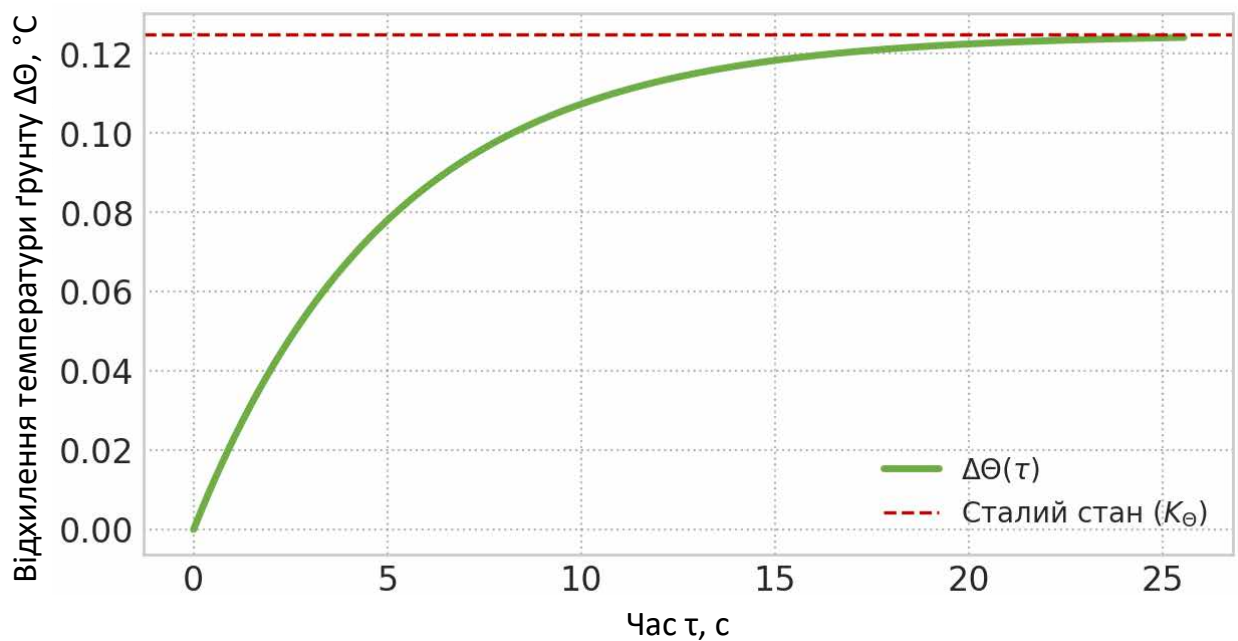


Рисунок 2.10 – Перехідний процес за каналом «потужність підігріву ґрунту – температура ґрунту»

2.5. Розробка функціонально-технологічної схеми автоматизації.

Синтезована на попередніх етапах декомпозиційна структура динамічних каналів є теоретичним підґрунтям для безпосередньої апаратної реалізації системи керування мікрокліматом споруди захищеного ґрунту.

Перехід до проектування функціонально-технологічної схеми автоматизації культиваційної споруди вимагає раціонального поєднання первинних вимірювальних перетворювачів, регулюючих органів та виконавчих механізмів, здатних забезпечити задані показники якості у виділених технологічних контурах [11] (рис. 2.11).

Таблиці 2.5 – Зведені числові значення статичних коефіцієнтів передачі та сталих часу за основними та перехресними каналами керування

№	Вхідний вплив (Керування / Зв'язок)	Вихідна координата стану	Тип каналу зв'язку	Позн-ня ПФ	Коеф. передачі, Кі	Одиниця вимір., Кі	Стала часу, Ті (с)
1	Потужність калориферів (ΔP_n)	Температура повітря (Δt)	Основний керуючий	Wt(s)	0.052	°C / кВт	320
2	Витрата вентиляційного повітря (ΔG_{vent})	Вологовміст повітря (Δd)	Основний керуючий	Wd(s)	-0.085	(г/кг) / (м³/год)	140
3	Потужність підігріву ґрунту (ΔP_{gr})	Температура ґрунту ($\Delta \theta$)	Основний керуючий	W θ (s)	0.125	°C / кВт	18 400
4	Витрата вентиляційного повітря (ΔG_{vent})	Температура повітря (Δt)	Перехрес- ний збуджуючий	Wtg(s)	-0.142	°C / (м³/год)	140
5	Потужність підігріву ґрунту (ΔP_{gr})	Температура повітря (Δt)	Перехресний зв'язок	Wt_gr(s)	0.018	°C / кВт	3 600
6	Потужність калориферів (ΔP_n)	Температура ґрунту ($\Delta \theta$)	Перехрес- ний зв'язок	W θ_n (s)	0.004	°C / кВт	22 000
7	Температура повітря (Δt)	Вологовміст повітря (Δd)	Внутрішній структурний	Wdt(s)	0.245	(г/кг) / °C	180

Відповідно до критеріїв енергетичної ефективності та біологічних вимог рослин, побудова загальної архітектури автоматизації базується на триконтурній децентралізованій системі, де координація локальних підсистем покладається на високопродуктивний промисловий програмований логічний контролер Schneider Electric Modicon M251 (позначений на схемі як UIC). Програмне забезпечення ПЛК M251 (рис. 2.12) дозволяє не лише реалізувати

алгоритми багатоконтурного ПД-регулювання, а й здійснювати інваріантне керування за принципом метеокompенсації збурень за навантаженням. Для цього інформаційне ядро системи доповнене винесеними за межі споруди датчиком температури зовнішнього повітря TE-2 та датчиком вологості зовнішнього повітря ME-8, що дозволяє завчасно розраховувати дефіцит вологовмісту і теплові втрати та формувати випереджальні керуючі впливи ще до виникнення значних температурно-вологісних зсувів у внутрішньому об'ємі споруди [1-2, 5].

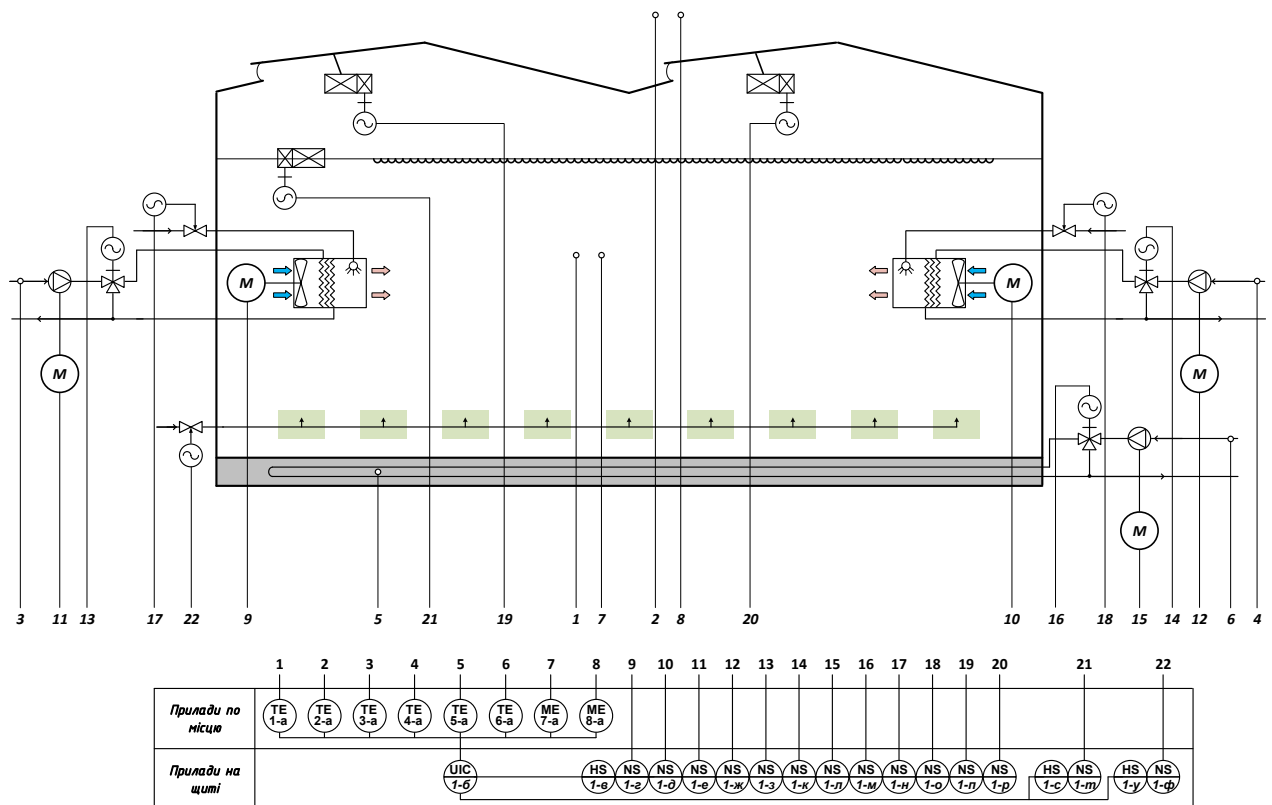


Рисунок 2.11 – Функціонально-технологічна схема автоматизації

Технічна реалізація базового контуру стабілізації теплового режиму повітряного середовища базується на застосуванні двох потужних повітрообробних установок, розміщених вздовж протилежних бічних стін споруди, основу яких складають водяні калорифери типу КСК 2-10 (ПНВ 113-206-01) (рис. 2.13). Зазначені теплообмінні апарати промислового виконання мають номінальну теплову потужність 99.4 кВт та розраховані на забезпечення

об'ємної продуктивності по повітрю до 8000 м³/год кожен. Конструктивна специфіка калориферів КСК 2-10, що містять два ряди сталевих несучих труб із біметалевим спіралью-накатним алюмінієвим оребренням АД0 та площею поверхні теплообміну 17.4 м², зумовлює високу ефективність передачі енергії від рідкого теплоносія робочому середовищу при максимальному робочому тиску до 1.2 МПа.

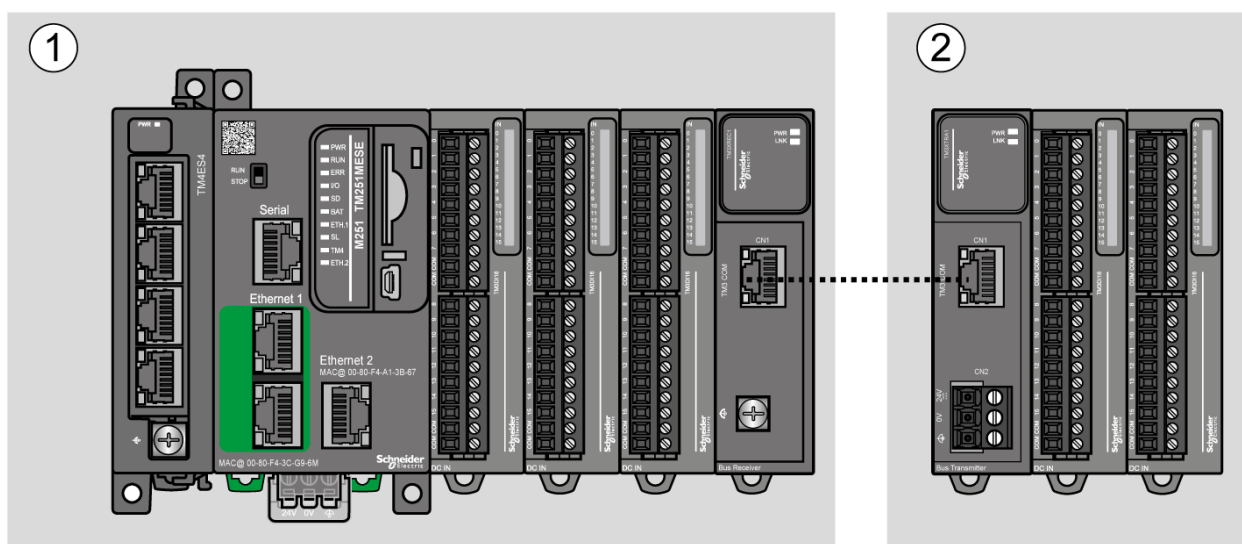


Рисунок 2.12 – Програмований логічний контролер Schneider Electric Modicon M251 з модулями введення/виведення в локальній конфігурації (1) та дистанційні модулі введення/виведення (2)



Рисунок 2.13 – Водяний каналний калорифер типу КСК 2-10

Алгоритм керування повітряним опаленням носить комбінований якісно-кількісний характер: якісне регулювання забезпечується зміною температури

теплоносія через моторизовані триходові змішувальні клапани із сервоприводами, а кількісне регулювання полягає у плавній зміні обертів осевих вентиляторів шляхом частотного регулювання асинхронних електродвигунів за допомогою промислових перетворювачів частоти NS-9 та NS-10. Математично закон формування комбінованого керуючого впливу $u_t(t)$ реалізується ПЛК M251 на основі поточної неузгодженості температури внутрішнього повітря від заданої уставки $\Delta t(t)$, що мінімізує статичну похибку та суттєво заощаджує електричну енергію у перехідних режимах роботи.

Регулювання вологісного режиму за основним контуром «витрата вентиляції – вологовміст повітря» здійснюється шляхом організації природного повітровообміну через систему дахових фрамуг, розташованих у верхній частині теплиці NS-19, NS-20. Плавне або позиційне відкриття вентиляційних отворів для асиміляції надлишкової вологи та скидання теплонадлишків забезпечується електричними сервоприводами фрамуг, які отримують командні імпульси від обчислювального комплексу залежно від обчисленого значення абсолютної вологості d з урахуванням показань внутрішніх датчиків температури TE-1, відносної вологості повітря та параметрів навколишнього середовища. Для компенсації зворотного процесу, тобто критичного падіння вологості повітря у спекотні періоди, технологічна схема передбачає субординоване підключення додаткового контуру зволоження. Цей контур апаратно реалізований у вигляді форсуночних розпилювачів високого тиску, вмонтованих безпосередньо у корпуси повітряних калориферів КСК 2-10, і керується за допомогою двоходових електромагнітних запірних клапанів NS-17 та NS-18 за дискретними чи широтно-імпульсними алгоритмами контролера [4].

Найбільш інерційний технологічний контур «потужність підігріву ґрунту – температура ґрунту» функціонує в режимі повільної стабілізації з урахуванням значного транспортного та ємнісного запізнення поширення теплового фронту у твердому субстраті. Апаратне забезпечення цього каналу включає магістральну систему підґрунтового опалення з трубними колекторами, заглибленими у нижній шар ґрунтової матриці, де первинна

інформація зчитується занурювальним датчиком TE-5. Керування еквівалентною потужністю підігріву здійснюється через окремий змішувальний вузол, який містить циркуляційний насос NS-15 та триходовий клапан з електроприводом NS-16. Паралельно з контуром базового опалення субстрату на схемі виділено технологічну лінію локального підігріву зони росту рослин або крапельного зрошення, яка підведена безпосередньо до кореневої системи культури і регулюється автономним двоходовим запірно-регулюючим клапаном NS-22 з метою оптимізації водоспоживання [11]. Для захисту фітоценозу від екстремальних рівнів сонячної інсоляції та зниження лучистих тепловтрат у нічний час під дахом теплиці передбачена підсистема горизонтального екранування, механічна частина якої приводиться в дію за допомогою реверсивного мотор-редуктора NS-21. Зважаючи на суттєву різницю сталих часу повітряного та ґрунтового середовищ, взаємодія між усіма виділеними контурами автоматизації координується на програмному знайденні контролера Modicon M251 за допомогою рознесення частот квантування сигналів у загальному багатоканальному комплексі, що буде повністю виключати появу автоколивальних режимів і буде гарантувати збалансоване функціонування всієї багатозв'язної системи клімат-контролю.

РОЗДІЛ 3.

ВИБІР ТЕХНІЧНИХ ЗАСОБІВ ТА СИНТЕЗ ЦИФРОВОЇ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ

3.1. Обґрунтування загальної структури комп'ютерно-інтегрованої системи керування.

Створення ефективного середовища для вирощування сільськогосподарських культур у двопролітному тепличному комплексі потребує розробки гнучкої та стійкої архітектури керування, здатної узгоджувати роботу багатьох взаємопов'язаних технологічних контурів. Для вирішення нашої задачі побудуємо багаторівневу комп'ютерно-інтегровану систему керування, яка базується на принципах розподіленого збору інформації та децентралізованого виконання керуючих впливів [13]. Проектована архітектура автоматизації клімат-контролю структурована за класичною трирівневою ієрархічною схемою, де кожен рівень виконує чітко визначений спектр завдань, починаючи від безпосередньої взаємодії з фізичними процесами і закінчуючи глобальним диспетчерським моніторингом. Такий підхід дозволяє відокремити швидкі детерміновані процеси локального регулювання від більш повільних процедур людино-машинного інтерфейсу, мінімізуючи ризики критичних збоїв системи.

Основою побудованої ієрархії є нижній або польовий рівень, який безпосередньо взаємодіє з об'єктом керування. До його складу входять усі первинні вимірювальні перетворювачі, включаючи внутрішні датчики температурного та вологісного режимів, занурювальні сенсори підігріву субстрату, а також спеціалізовані метеорологічні датчики зовнішнього повітря, що забезпечують реалізацію алгоритму метеокompенсації. Інформаційні потоки з датчиків передаються у вигляді уніфікованих аналогових сигналів струмової петлі 4...20 мА, що гарантує високу інваріантність лінії зв'язку до електромагнітних завад, створюваних силовими комутаційними апаратами. Фізичну реалізацію керівних рішень на цьому ж рівні забезпечують виконавчі

механізми, зокрема моторизовані сервоприводи Belimo для плавного позиціонування триходових клапанів, соленоїдні вентилі Danfoss у контурі форсуночного зволоження та лінійні приводи дахових фрамуг природної вентиляції [2].

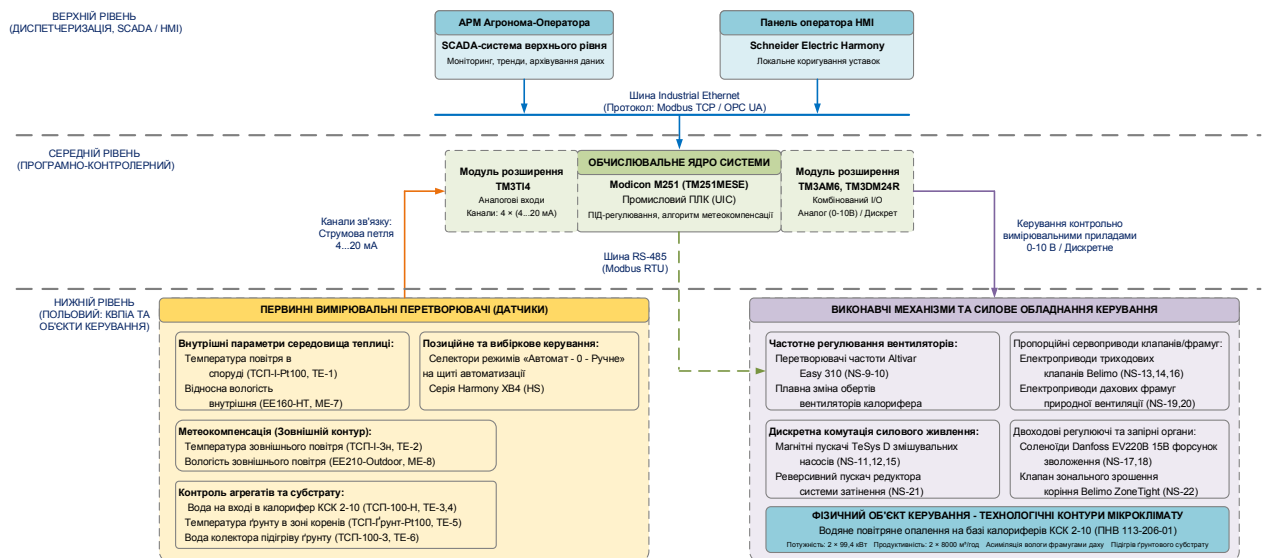


Рисунок 3.1 – Структурна схема комп'ютерно-інтегрованої системи керування мікрокліматом теплиці з відображенням міжрівневих зв'язків та протоколів передачі даних

Головним центром та обчислювальним ядром КІСУ є середній (контролерний) рівень, реалізований на базі високопродуктивного промислового програмованого логічного контролера Schneider Electric Modicon M251. На цьому етапі відбувається циклічне опитування модулів розширення аналогового введення, програмна фільтрація високочастотних шумів датчиків, математичний розрахунок поточної абсолютної вологості та дефіциту вологовмісту, а також безпосереднє обчислення цифрових законів ПІД-регулювання. Для обміну даними між ПЛК M251 та силовими силовими блоками зміни частоти обертів вентиляторів калориферів КСК 2-10 використовується цифрова промислова мережа Modbus RTU, розгорнута поверх фізичного інтерфейсу RS-485. Це дозволяє передавати в пам'яті контролера не лише команди завдання швидкості для перетворювачів частоти

Altivar Easy 310, але й розширену телеметрію щодо споживаного струму, теплового стану та можливих аварійних режимів асинхронних двигунів без прокладання додаткових сигнальних кабелів.

Верхній рівень системи орієнтований на забезпечення взаємодії інженерно-агрономічного персоналу з автоматикою та виконує функції супервізорного керування та збору даних (SCADA/HMI). Інформаційний зв'язок між середнім та верхнім рівнями організовано через високошвидкісну локальну мережу Industrial Ethernet із використанням прикладного протоколу Modbus TCP або сучасного стандарту OPC UA [14]. На цьому рівні функціонує автоматизоване робоче місце оператора, де у реальному часі візуалізуються поточні мнемосхеми стану теплиці, ведеться довготривале архівування кліматичних трендів, фіксуються позаштатні та аварійні ситуації у журналі подій, а також надається можливість оперативного коригування технологічних уставок. Завдяки такій структурі будь-які маніпуляції користувача на верхньому рівні жодним чином не порушують детермінованість та безперервність виконання критично важливих алгоритмів стабілізації мікроклімату, які локально прораховуються безпосередньо у ПЛК Modicon M251MESE [15].

3.2. Специфікація та технічні характеристики комплексу засобів автоматизації.

Ефективність функціонування комп'ютерно-інтегрованої системи керування мікрокліматом теплиці безпосередньо залежить від обґрунтованого вибору комплексу засобів автоматизації. В даному проєкті побудова системи ґрунтується на базі уніфікованої апаратної платформи компанії Schneider Electric, що дозволяє досягти високого рівня технологічної сумісності, мінімізувати час на пусконаладжувальні роботи та забезпечити тривалий життєвий цикл обладнання. Основним обчислювальним вузлом середнього рівня обрано промисловий програмований логічний контролер Modicon M251, який має розширені комунікаційні можливості завдяки вбудованим портам

Ethernet та підтримці сучасних індустріальних протоколів обміну даними. Даний контролер забезпечує детерміноване виконання прикладних програм та координацію роботи підключених модулів розширення серії TM3, що здійснюють безпосереднє збирання та первинну обробку інформаційних потоків від польових пристроїв [14].

Конструктивні особливості програмованого логічного контролера Modicon M251 визначають його як оптимальну платформу для керування об'єктами з розподіленою архітектурою. Функціональна схема пристрою передбачає наявність двох незалежних портів Ethernet, що дозволяє фізично розділити мережу верхнього рівня (зв'язок із диспетчерським пунктом SCADA) та локальну мережу польових компонентів чи панелей HMI (рис. 3.2).



**Рисунка 3.2 – Зовнішній вигляд ПЛК Schneider Electric
Modicon M251MESE**

Процесорний модуль має високу швидкодію обробки булевих операцій, що мінімізує час циклу задачі та гарантує миттєву реакцію на зміну технологічних параметрів. Приєднання модулів розширення TM3TI4 (рис. 3.3), TM3AM6 (рис. 3.4a) та TM3DM24R (рис. 3.4б) здійснюється за допомогою внутрішньої високошвидкісної шини, яка забезпечує надійне передавання

оцифрованих сигналів без завад. Модуль аналогового введення TM3TI4 оснащений вбудованими засобами фільтрації мережових наведень частотою 50 Гц, що критично в умовах роботи потужного силового обладнання теплиці [15].



Рисунка 3.3 – Зовнішній вигляд модулів розширення TM3TI4



а)



б)

**Рисунка 3.4 – Зовнішній вигляд модулів розширення
TM3AM6 та TM3DM24R**

Польовий рівень представлений високоточними первинними вимірювальними перетворювачами, технічні характеристики яких підібрані з урахуванням специфіки роботи в умовах підвищеної вологості, сонячної

радіації та температурних коливань тепличних комплексів. Для моніторингу відносної вологості та температури повітря всередині споруди та у зовнішньому середовищі застосовано промислові датчики серії EE160 (рис. 3.5). Їхня робота базується на використанні ємнісного чутливого елемента останнього покоління, який має стійкість до утворення конденсату та агресивної дії хімічних випарів від мінеральних добрив. Датчики здійснюють лінійне перетворення фізичних величин в уніфікований аналоговий сигнал струмової петлі 4...20 мА. Визначення температурних режимів теплоносія в калориферах та субстрату в зоні кореневої системи покладено на термоперетворювачі опору Pt100 з індивідуальними нормуючими підсилювачами, які змонтовані безпосередньо в захисних головках пристроїв [17].



Рисунка 3.5 – Зовнішній вигляд комбінованого датчика вологості та температури повітря серії EE160 для настінного монтажу

Керуючі впливи, що формуються процесорним модулем, передаються на виконавчі механізми через модулі аналогового та дискретного виведення, а також за допомогою цифрових мережевих інтерфейсів. Для плавного регулювання продуктивності вентиляторів опалювальних калориферів КСК 2-10 у специфікації передбачено використання перетворювачів частоти Altivar Easy 310 (рис. 3.6). Ці силові пристрої реалізують алгоритми просторово-

векторного керування магнітним потоком статора, що дозволяє підтримувати номінальний крутний момент асинхронного двигуна навіть на наднизьких частотах обертання.



Рисунка 3.6 – Зовнішній вигляд перетворювачів частоти Altivar Easy 310

Регулювання швидкості обертання ротора здійснюється шляхом пропорційної зміни частоти живильної напруги відповідно до математичної залежності:

$$n = \frac{60f}{p} (1 - s), \quad (3.1)$$

де f – вихідна частота перетворювача;

p – кількість пар полюсів обмотки статора двигуна;

s – відносне ковзання ротора.

Інтегрований протокол Modbus RTU через фізичний інтерфейс RS-485 забезпечує передачу діагностичних даних про струм навантаження та тепловий стан двигуна безпосередньо в пам'ять контролера [16].

Керування гідродинамічними потоками теплоносія реалізується за допомогою виконавчих механізмів компанії Belimo (рис. 3.7). Електроприводи серії LR24A-SR для триходових клапанів працюють на базі безщіткових двигунів постійного струму під керуванням мікроконтролера, що забезпечує

точне позиціонування штока клапана пропорційно до вхідного сигналу напруги 0...10 В. Пристрої мають вбудовану систему захисту від блокування та автоматично зупиняються при досягненні механічних упорів, що виключає потребу в кінцевих вимикачах.



Рисунка 3.7 – Зовнішній вигляд електроприводу та триходового регулюючого шарового клапану Belimo

Для контуру форсуночного зволоження використано соленоїдні двоходові клапани Danfoss EV220B, які використовують принцип розвантажувального затвора з гнучкою мембраною з еластомеру, що гарантує швидке перекриття магістралі високого тиску та виключає виникнення гідроударів у трубній системі теплиці [18] (рис. 3.8).



Рисунка 3.7 – Зовнішній вигляд соленоїдного двоходового клапану Danfoss EV220B

Повна інтегрована специфікація засобів автоматизації таких як контролерного обладнання, вимірювальних пристроїв та виконавчих механізмів, наведена в табл. 3.1.

Таблиця 3.1 – Специфікація та технічні характеристики комплексу засобів автоматизації системи керування мікрокліматом теплиці

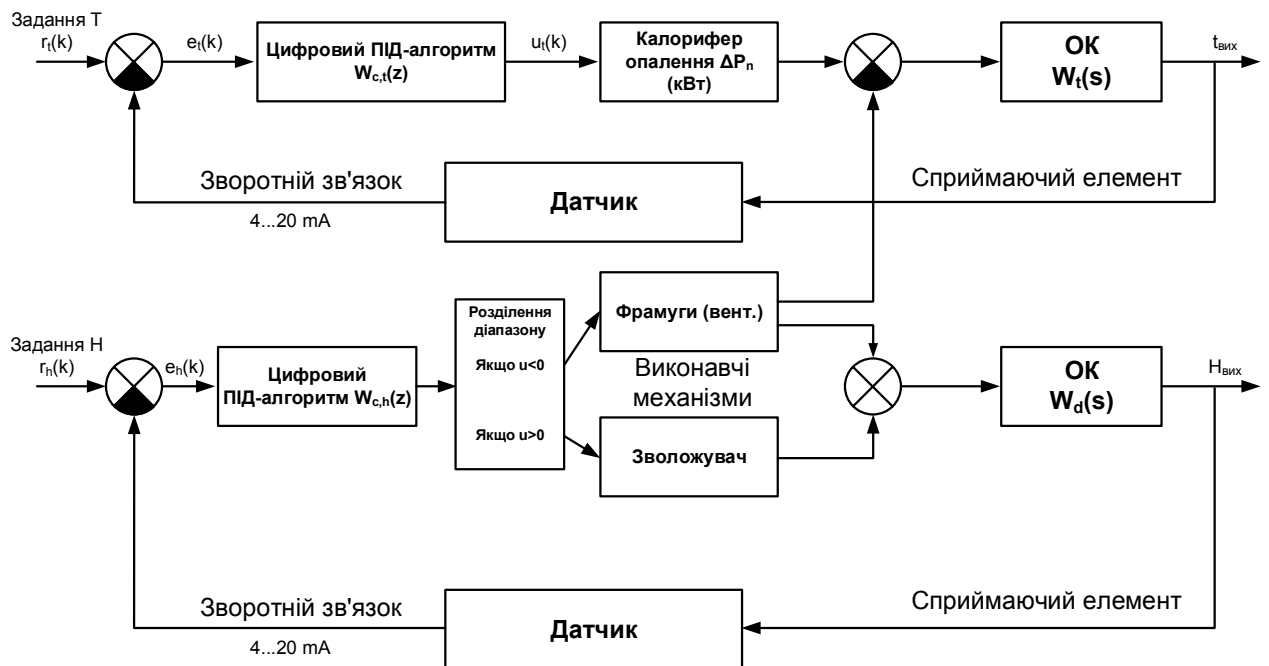
Найменування елемента	Тип, модель, виробник	Основні технічні характеристики	Призначення в КІСУ мікроклімату
1	2	3	4
Програмований логічний контролер	Schneider Electric Modicon M251 (TM251MESE)	Живлення 24 В постійного струму, вбудовані порти Dual Ethernet, RJ45 Serial Link, слот SD-карти, швидкість обробки логічних інструкцій 22 нс	Обчислювальне ядро системи, реалізація алгоритмів ПІД-регулювання, метеокompенсації та логічного блокування
Модуль аналогового введення	Schneider Electric Modicon TM3 (TM3TI4)	Кількість каналів: 4 аналогових входи, роздільна здатність 12 або 11 біт плюс знак, конфігуровані типи сигналів 4...20 мА, 0...20 мА, 0...10 В	Збір інформації від первинних датчиків температури та відносної вологості повітря
Модуль комбінованого введення/виведення	Schneider Electric Modicon TM3 (TM3AM6)	Кількість каналів: 4 аналогових входи та 2 аналогових виходи, роздільна здатність виходу 12 біт, тип вихідного сигналу 0...10В	Формування аналогових сигналів керування для приводів клапанів та фрамуг вентиляції
Модуль комбінованого введення/виведення	Schneider Electric Modicon TM3 (TM3DM24R)	Кількість каналів: 16 дискретних входів та 8 дискретних виходів	Формування дискретних сигналів керування
Датчик температури та вологості внутрішній/зовнішній	E+E Elektronik EE160-HT	Діапазон вимірювання вологості 10...95%, діапазон температури - 15...+60 °С, вихідний сигнал 4...20 мА, живлення 24 В, похибка вимірювання вологості $\pm 2\%$	Безпосередній моніторинг параметрів повітряного середовища в та зовні теплиці,
Термоперетворювачі опору технологічні	ТСП-100 (Pt100) з нормуючим підсилювачем	Чутливий елемент класу А, вбудований перетворювач у головку датчика, вихідний струм 4...20 мА, гільза з нержавіючої сталі	Контроль температури теплоносія калориферів, колектора підігріву ґрунту та самого субстрату

Прод. табл. 3.1

1	2	3	4
Перетворювач частоти вентиляторів калорифера	Schneider Electric Altivar Easy 310 (ATV310HU22N4E)	Потужність 2,2 кВт, трифазне живлення 380 В, вбудований протокол Modbus RTU через інтерфейс RS-485, перевантажувальна здатність 150%	Плавне регулювання частоти обертів двигунів осьових вентиляторів калориферів КСК 2-10
Електропривод триходових клапанів	Belimo LR24A-SR	Крутний момент 4 Нм, час ходу 150 с, живлення 24 В змінного або постійного струму, керуючий сигнал 0...10 В, захист IP54	Пропорційне керування виконавчим органом на змішувальних вузлах контурів опалення
Електропривод віконних фрамуг	Belimo форсований лінійний привід	Зусилля 450 Н, хід штока до 300 мм, напруга живлення 24 В, керування дискретне або аналогове 0...10 В	Автоматичне відкриття та закриття вентиляційних фрамуг даху для асиміляції вологи
Контактори силові керування насосами	Schneider Electric TeSys D (LC1D09BL)	Номінальний струм 9 А, напруга керування котушки 24 В постійного струму з низьким споживанням, додаткові контакти 1НО+1НЗ	Дискретне увімкнення та вимкнення трифазних циркуляційних насосів водяних контурів
Соленоїдний клапан системи зволоження	Danfoss EV220B 15B	Двоходовий, нормально закритий, сервоприводний, приєднання G 1/2, матеріал корпусу – латунь, котушка живлення 24 В	Комутація подачі високонапірної води на розпилюючі форсунки зволоження повітря
Органи місцевого керування та індикації	Schneider Electric Harmony XB4	Металева основа, діаметр 22 мм, конфігуровані блок-контакти, селектори на 3 положення з фіксацією	Перемикання режимів роботи обладнання між автоматичним, нульовим та ручним безпосередньо на ІЦА

3.3. Синтез та дискретизація цифрових регуляторів температури та вологості.

Для автоматизації мікроклімату теплиці застосовано децентралізований підхід до керування. Система розділяється на два автономні контури регулювання: контур підтримання температури повітря (основний) та контур регулювання відносної вологості (додатковий) (рис. 3.8). Взаємозв'язок між каналами, зокрема охолодження повітря при відкритті вентиляційних фрамуг або падіння відносної вологості під час роботи калорифера, розглядається у вигляді динамічних збурень. Здатність системи компенсувати ці збурення забезпечується за рахунок властивостей зворотного зв'язку та робастності налаштувань ПІД-регуляторів.



Рисунка 3.7 – Спрощена структурна схема двоконтурної дискретної системи автоматичного регулювання з логікою розділення діапазону та компенсацією перехресних збурень

Для реалізації алгоритмів керування у промисловому контролері вийдемо з неперервного закону ПІД-регулювання, що аналізує похибку $e(t)$:

$$u(t) = K_p \left(e(t) + \frac{1}{T_i} \int_0^t e(\tau) d\tau + T_d \frac{de(t)}{dt} \right), \quad (3.2)$$

де K_p – коефіцієнт підсилення регулятора;

T_i – стала часу інтегрування;

T_d – стала часу диференціювання.

За правилами теорії автоматичного керування, щоб цифрова система працювала адекватно (без втрати інформації), крок квантування T_s має бути щонайменше в 10...20 разів меншим за найменшу сталу часу об'єкта: $T_s \leq (0.1 \dots 0.005)T_{min}$, т.к. найшвидший процес це зміна вологості через фрамуги ($T = 140$ с), то розрахований $T_{min} = 140 \text{ с} \cdot 0.1 = 14$ с, тобто можна прийняти єдиний крок дискретизації $T_s = 1.0$ с, що спрощує узгодження даних у програмі ПЛК. Розраховані методом інженерних критеріїв оптимальні параметри неперервних регуляторів-прототипів становлять:

– для контуру температури: $K_{p,t} = 12,5 \text{ кВт/}^\circ\text{C}$, $T_{i,t} = 320$ с, $T_{d,t} = 15$ с;

– для контуру вологості: $K_{p,h} = -8.0 \text{ кВт/}^\circ\text{C}$, $T_{i,h} = 140$ с, $T_{d,h} = 5$ с/

Для програмної реалізації в мікропроцесорному пристрої перейдемо від неперервної форми до дискретної інкрементної форми ПІД-алгоритму. Вибір інкрементної форми зумовлений її стійкістю до явища «інтегрального насичення» при обмеженнях на хід виконавчих механізмів. Рівняння приросту керуючого сигналу Δu_k на кожному кроці квантування має вигляд:

$$\Delta u_k = q_0 e_k + q_1 e_{k-1} + q_2 e_{k-2}, \quad (3.3)$$

де e_k, e_{k-1}, e_{k-2} – значення відхилення технологічного параметра від завдання на поточному, попередньому та поза попередньому кроках дискретизації відповідно;

q_0, q_1, q_2 – дискретні коефіцієнти алгоритму які є функціями від параметрів неперервного регулятора та кроку квантування, що розраховуються за формулами:

$$q_0 = K_p \left(1 + \frac{T_d}{T_s}\right); \quad q_1 = -K_p \left(1 + \frac{2T_d}{T_s} - \frac{T_d}{T_i}\right); \quad q_2 = K_p \frac{T_d}{T_s}. \quad (3.4)$$

Виконаємо числову підстановку параметрів для кожного контуру мікроклімату теплиці для кроку $T_s = 1.0$ с.

Розрахуємо контур регулювання температури (опалення): $q_{0,t} = 12.5 \left(1 + \frac{15}{1.0}\right) = 200.0$; $q_{1,t} = -12.5 \left(1 + \frac{2 \cdot 15}{1.0} - \frac{1.0}{320}\right) = -387.46$; $q_{2,t} =$

$12.5 \frac{15}{1.0} = 187.5$. Дискретне робоче рівняння для каналу калорифера:

$$\Delta u_{k,t} = 200.0 e_{k,t} - 387.46 e_{k-1,t} + 187.5 e_{k-2,t}. \quad (3.5)$$

Розрахуємо контур регулювання вологості (зволоження та вентиляція):

$$q_{0,h} = -8.0 \left(1 + \frac{5}{1.0}\right) = -48.0; \quad q_{1,h} = -(-8.0) \left(1 + \frac{2.5}{1.0} - \frac{1.0}{140}\right) = 87.94; \quad q_{2,h} = -8.0 \frac{5}{1.0} = -40.0.$$

Дискретне робоче рівняння для каналу вологообміну:

$$\Delta u_{k,h} = -48.0 e_{k,h} + 87.94 e_{k-1,h} - 40.0 e_{k-2,h}. \quad (3.6)$$

Отриманий сигнал керування $u_{k,h}$ розподіляється за принципом розділення діапазону: якщо розрахункове значення $u_{k,h} > 0$, ПЛК подає команду на виконавчий механізм форсуночного зволожувача повітря. Якщо $u_{k,h} < 0$, значення інвертується і передається як команда на відкриття вентиляційних фрамуг для асиміляції надлишкової вологи за рахунок зовнішнього повітря.

3.4. Аналіз стійкості та якості замкненої цифрової системи керування.

Оскільки синтезована система функціонує у дискретному часі з кроком $T_s = 1.0$ с, класичні методи неперервного аналізу замінюються методами дискретної теорії автоматичного керування в Z-області [12]. Оцінка стійкості базується на дослідженні розташування коренів характеристичного рівняння замкненої системи відносно одиничного кола на комплексній площині, тоді як якісні показники визначаються шляхом комп'ютерного моделювання перехідних процесів при ступінчастих змінах керуючих впливів та дії взаємних канальних збурень [12].

Для проведення теоретичного аналізу стійкості виконано перехід від безперервних передатних функцій каналів теплиці до їх дискретних аналогів з урахуванням наявності фіксатора нульового порядку в інтерфейсі виводу керування. Передатна функція безперервного об'єкта по температурному каналу:

$$W_t(s) = \frac{0.052}{320s+1}, \quad (3.7)$$

після проведення Z-перетворення набуває вигляду:

$$W_t(z) = \frac{1.622 \cdot 10^{-4}}{z - 0.9969}. \quad (3.8)$$

Відповідно, передатна функція дискретного ПІД-регулятора температури, представлена у позиційній формі через раніше розраховані коефіцієнти, записується як:

$$W_{c,t}(z) = \frac{200.0z^2 - 387.46z + 187.5}{z^2 - z}. \quad (3.9)$$

Характеристичне рівняння замкненого контуру регулювання температури визначається з відомого виразу $1 + W_{c,t}(z)W_t(z) = 0$. Після алгебраїчних перетворень це рівняння зводиться до полінома третього степеня, аналіз коренів якого підтверджує, що всі полюси замкненої системи розташовані всередині одиничного кола на комплексній площині, а їх максимальний за модулем складник не перевищує меж безпечної зони стійкості [13]. Конкретні значення отриманих дискретних полюсів та їхні математичні модулі наведено у табл. 3.2, що засвідчує наявність належного інженерного запасу стійкості системи.

Таблиця 3.2 – Результати розрахунку полюсів характеристичних рівнянь дискретних контурів регулювання мікроклімату теплиці

Контур регулювання	Позначення полюса	Значення полюса у Z-області, z_i	Модуль полюса, $ z_i $	Стан стійкості контуру
Контур регулювання температури повітря	$z_{1,t}$	$0.9975 + 0.0003j$	0.9975	Стійкий ($ z_{1,t} < 1$)
	$z_{2,t}$	$0.9975 - 0.0003j$	0.9975	Стійкий ($ z_{2,t} < 1$)
	$z_{3,t}$	$-0.0306 + 0.0000j$	0.0306	Стійкий ($ z_{3,t} < 1$)
Контур регулювання відносної вологості	$z_{1,h}$	$0.9942 + 0.0012j$	0.9942	Стійкий ($ z_{1,h} < 1$)
	$z_{2,h}$	$0.9942 - 0.0012j$	0.9942	Стійкий ($ z_{2,h} < 1$)
	$z_{3,h}$	$-0.0245 + 0.0000j$	0.0245	Стійкий ($ z_{3,h} < 1$)

Аналогічний підхід застосовано для дослідження контуру регулювання відносної вологості повітря споруди захищеного ґрунту. Дискретизована модель об'єкта за каналом вологообміну має вигляд:

$$W_d(z) = \frac{-6.049 \cdot 10^{-4}}{z - 0.9929}. \quad (3.10)$$

Передатна функція цифрового регулятора вологості описується виразом:

$$W_{c,h}(z) = \frac{-48.0z^2 + 87.94z - 40}{z^2 - z}. \quad (3.11)$$

Характеристичне поліноміальне рівняння контуру вологості також демонструє стабільність, оскільки розраховані дискретні коефіцієнти q_0, q_1, q_2 забезпечують ефективне демпфування коливань і локалізацію коренів у строго визначених стабільних межах комплексної Z -площини. Отримані аналітичні результати свідчать про те, що обраний єдиний крок квантування $T_s = 1.0$ с забезпечує стійку роботу обох децентралізованих контурів у номінальних режимах функціонування споруди.

Для верифікації теоретичних розрахунків та детального вивчення взаємодії каналів було розроблено імітаційну модель системи мікроклімату в середовищі числового моделювання. Структурна схема моделі, загальний вигляд якої представлено на рис. 3.8-9, повністю повторює раніше обґрунтовану топологію децентралізованого керування з логікою розділення діапазону регулятора вологості та перехресним зв'язком. Моделювання проводилося для сценарію, що імітує реальні умови експлуатації, коли одночасно відбувається зміна заданої температури на 2°C та заданої вологості на 5% , а також враховується негативний вплив відкриття вентиляційних фрамуг на тепловий баланс.

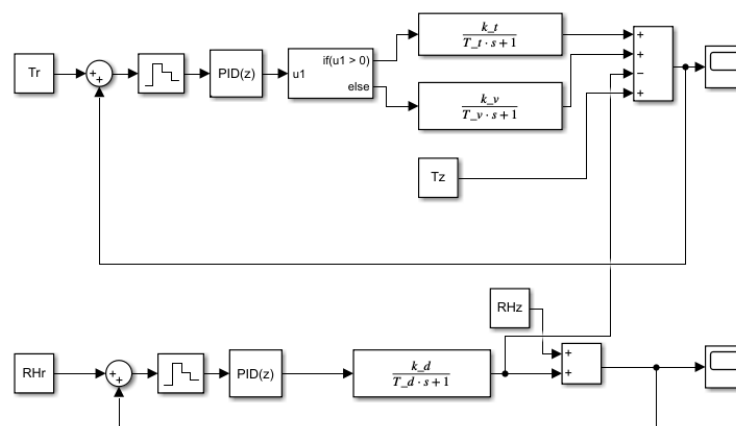


Рисунок 3.8 – Візуальна схема імітаційної моделі двоконтурної цифрової системи мікроклімату в програмному середовищі моделювання MATLAB/Simulink

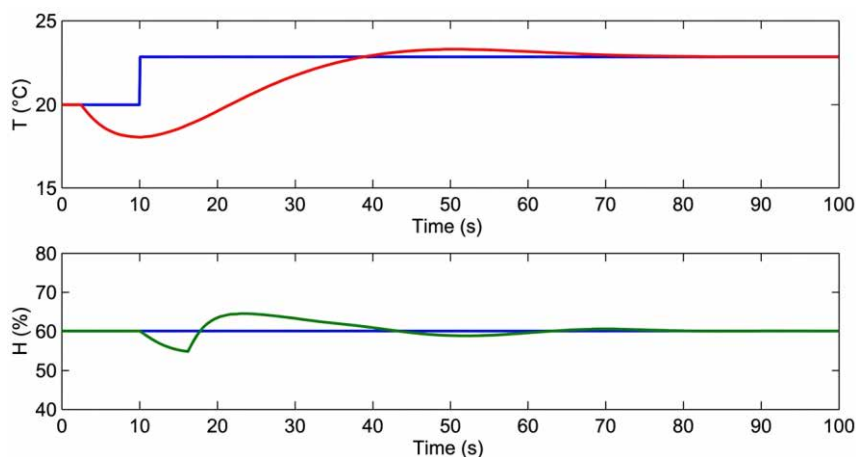


Рисунок 3.9 – Графіки перехідних процесів у замкненій цифровій системі при ступінчастій зміні уставки та дії міжканального збурення

Аналіз отриманих графіків перехідних процесів, наведених на рис. 3.9, дозволяє оцінити прямі показники якості регулювання синтезованої цифрової системи. Перехідна характеристика контуру температури характеризується аперіодичним (монотонним) характером без схильності до високочастотних коливань. Час регулювання температури становить близько 850 секунд, що є цілком прийнятним результатом для такого масивного інерційного об'єкта, як повітряний об'єм теплиці, а величина перерегулювання не перевищує технологічного порогу. Своєю чергою, контур вологості демонструє вищу швидкодію, досягаючи нового сталого стану за 380 секунд, при цьому максимальне динамічне відхилення у момент увімкнення фрамуг швидко компенсується алгоритмом регулювання. Завдяки інкрементній формі дискретних ПІД-алгоритмів, стала похибка регулювання в обох контурах у статичному режимі дорівнює нулю.

Окрему увагу під час комп'ютерного аналізу було приділено дослідженню робастності системи за наявності перехресного збурення від роботи виконавчих механізмів вентиляції. У момент інтенсивного відкриття фрамуг, коли в канал температури через динамічну ланку взаємозв'язку надходить збурювальний імпульс, у контурі опалення спостерігається короткочасне падіння температури повітря. Проте, завдяки вчасному

реагуванню цифрового регулятора температури, падіння компенсується додатковим увімкненням калорифера, а температурні коливання повністю загасають протягом короткого інтервалу часу. Зведені показники якості зафіксовані в табл. 3.3, що підтверджує високу інженерну точність розробленого проекту та його відповідність усім вихідним технологічним вимогам.

Таблиця 3.3 – Прямі показники якості функціонування замкненої цифрової системи автоматичного керування мікрокліматом

Контур регулювання та характер динамічного впливу	Час регулювання, t_{reg} (с)	Максимальне перерегулювання, σ (%)	Статична похибка, Δ_{stat}	Максимальне динамічне відхилення від дії збурення
Контур регулювання температури (Т)				
відпрацювання ступінчастої уставки ($\Delta T_{set}=+2^{\circ}\text{C}$)	850	0.0 (аперіодичний)	0.0 $^{\circ}\text{C}$	—
дія перехресного збурення (вплив вентиляції / зміна H_{set})	410	—	0.0 $^{\circ}\text{C}$	0.45 $^{\circ}\text{C}$
Контур регулювання вологості (Н)				
відпрацювання ступінчастої уставки ($\Delta H_{set}=-5\%$)	380	6.8	0.0 %	—
дія перехресного збурення (вплив нагріву / зміна T_{set})	180	—	0.0 %	1.20 %

РОЗДІЛ 4.

ТЕХНІЧНЕ ПРОЕКТУВАННЯ ТА ПРОГРАМНА РЕАЛІЗАЦІЯ

4.1. Обґрунтування схемотехнічних рішень та розробка принципових електричних схем.

При розробці цифрової системи керування мікрокліматом теплиці було спроектовано повний комплект принципових електричних схем, який розділено на два взаємопов'язані графічні аркуші: схему силових ланцюгів живлення та схему ланцюгів автоматизації, керування і моніторингу. Основною концепцією побудови схемотехнічної архітектури є повна гальванічна та просторова ізоляція низьковольтних інформаційних каналів від силових розподільних мереж, що мінімізує комутаційні завади та задовольняє жорстким критеріям промислової безпеки.

Проектуючи силову частину системи (рис. 4.1), закладено використання централізованого трифазного введення змінного струму з глухозаземленою нейтраллю. Для забезпечення плавного та енергоефективного регулювання продуктивності вентиляторів калориферів M1 і M2 потужністю по 2.2 кВт вони керуються частотними перетворювачами U1 та U2 серії Altivar ATV310HU22N4E. Для їх підключення використано схему (рис. 4.2), за якої трифазне живлення подається на вхідні термінали через захисні автомати двигуна, а вихідні лінії з'єднуються безпосередньо зі статорними обмотками.

Для гарантування безпеки обслуговуючого персоналу передбачаються локальні пости «Аварійний стоп» SB2 та SB4, які діють безпосередньо на дискретні входи частотних регуляторів, забезпечуючи миттєве блокування роботи приводів (рис. 4.3). Для циркуляційних насосів M3, M4 та насоса геотермального контуру M5 використовується класична схема прямого пуску через силові контакти контакторів KM1.1, KM2.1 та KM3.1.

При проектуванні каналу приводу зашторювання M6, який вимагає зміни напрямку руху використовуємо TESYS D (рис. 4.4) який має реверсивну пару контакторів KM4.1 та KM4.2, де взаємна перестановка фаз реалізована за

допомогою перехресного монтажу провідників, а безпека експлуатації забезпечується впровадженням мною подвійним механічним та електричним блокуванням у ланцюгах котушок керування.

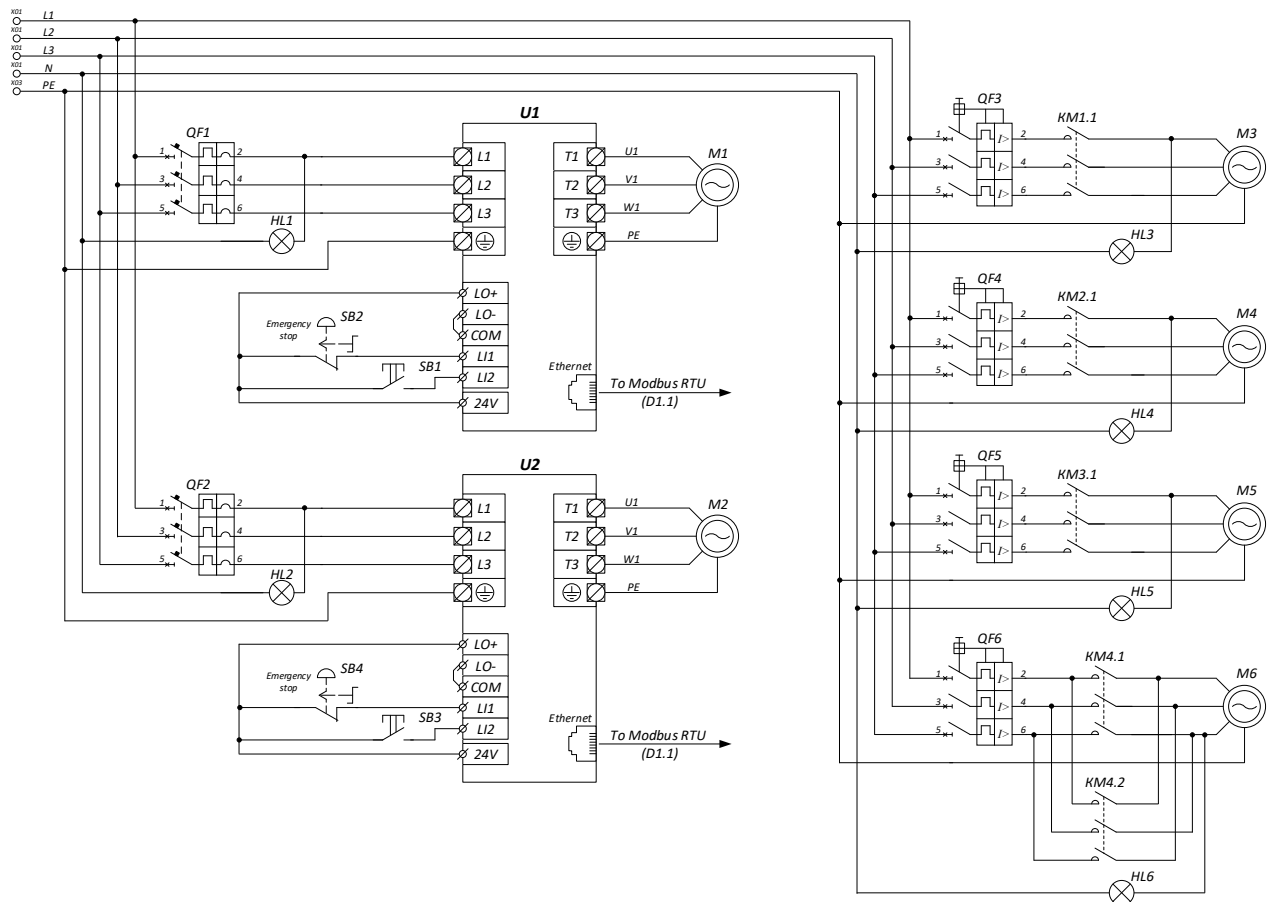
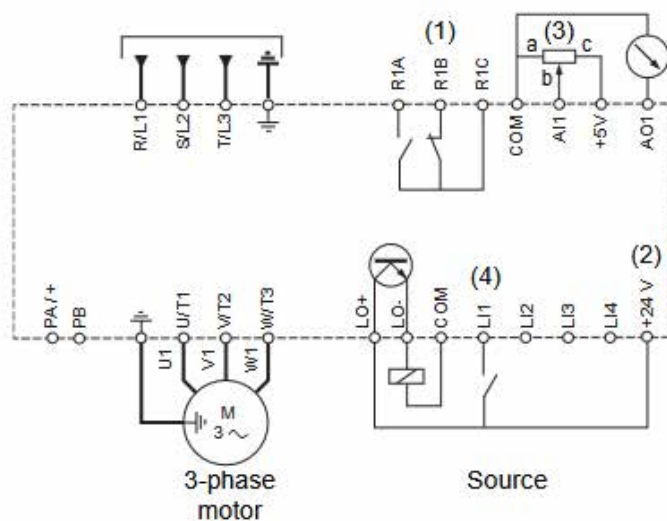


Рисунок 4.1 – Принципова електрична схема силових ланцюгів живлення виконавчих механізмів системи мікроклімату



- (1) контакти реле R1 для дистанційної індикації стану приводу;
- (2) внутрішнє живлення +24 В постійного струму;
- (3) потенціометр опорного напруги SZ1RV1202 (2.2 кОм) або аналогічний (максимум 10 кОм);
- (4) рух вперед

Рисунок 4.2 – Типова схема підключення ПЧ ATV310HU22N4E



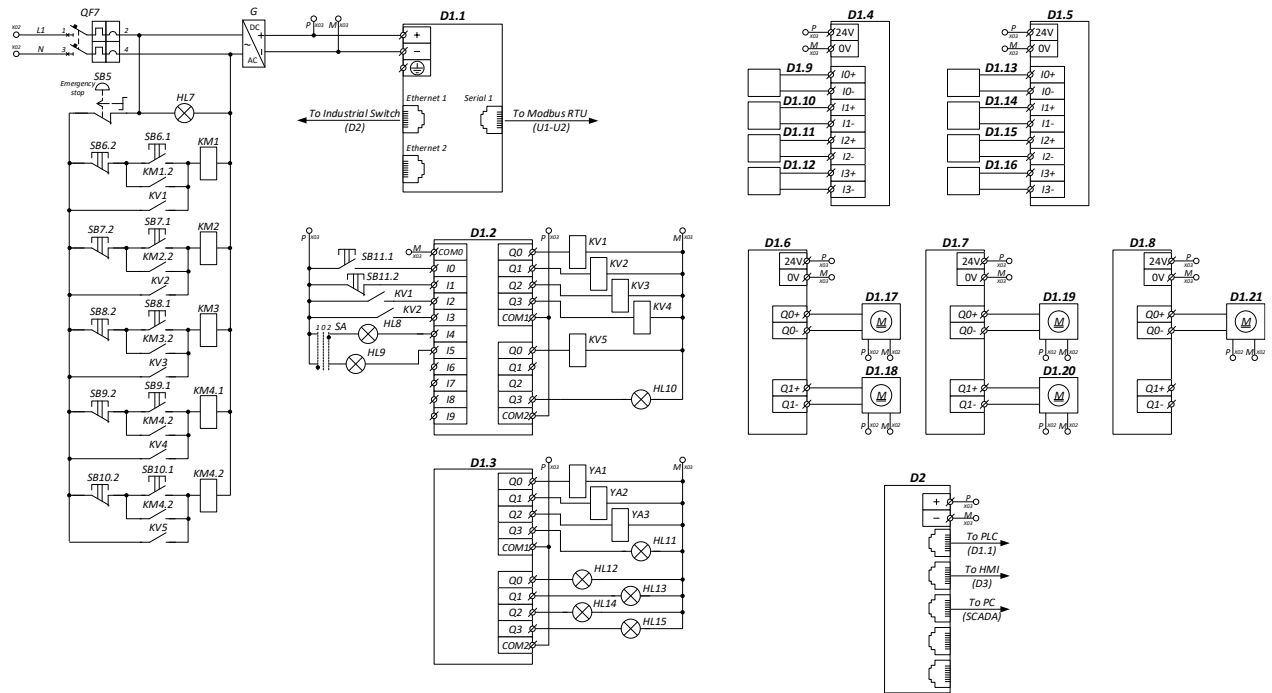
**Рисунок 4.3 – Зовнішній вигляд одномісного посту
"АВАРІЙНИЙ СТОП" XAL-D174**



Рисунок 4.4 – Зовнішній вигляд контактору реверсного LC2D09P7

На другому аркуші графічних матеріалів я представив Розроблена схема ланцюгів автоматизації та керування (рис. 4.5) в якій живлення низьковольтних пристроїв виділено в окремий однофазний контур, захищений двополюсним вимикачем QF7. Стабілізовану напругу 24 В DC, необхідну для роботи ПЛК та периферії, отримуємо завдяки інтеграції імпульсного блока живлення G серії HDR-30-24. На базі центрального контролера Modicon TM251MESE (D1.1) сформовано обчислювальне ядро системи, розширивши його можливості стеком модулів серії TM3. Підключення датчиків та виконавчих механізмів я виконав за типовими схемами для кожного типу сигналів. Так, для шести

датчиків температури ТСП-100 (D1.9–D1.14) я застосував двопровідну схему з'єднання з аналоговими модулями ТМЗТІ4 (D1.4 та D1.5) (рис. 4.6), що дозволило автоматично компенсувати опір ліній зв'язку. Датчики вологості ЕЕ160-НТ (D1.15 та D1.16) підключено за схемою «струмова петля» 4...20 мА для досягнення максимальної заводостійкості у вологому середовищі.



Для керування приводами Belimo триходових клапанів (D1.17 – D1.19) та фрамуг (D1.20 – D1.21) використовуємо аналогові виходи модулів TM3AM6 (D1.6 – D1.8) із сигналом 0...10 В (рис. 4.7).

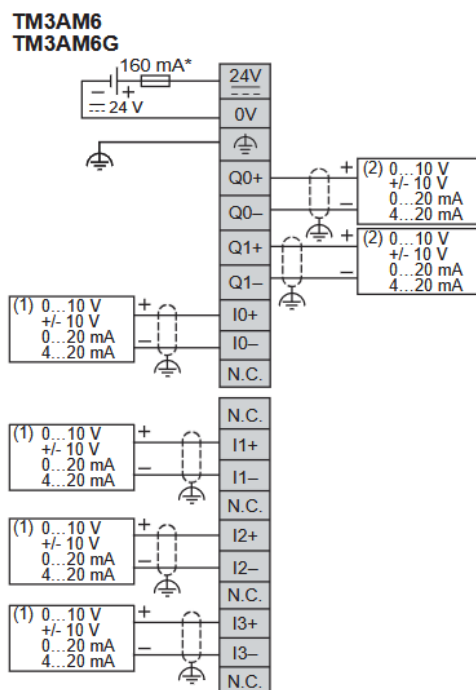


Рисунок 4.7 – Типова схема підключення до модуля розширення TM3AM6

Дискретну периферію, яка включає кнопки SB6 – SB11, перемикач режимів SA, котушки реле KV1 – KV5 та клапани Danfoss YA1 – YA3, комутовано через транзисторні та релейні канали модулів TM3DM24R (D1.2 та D1.3) (рис. 4.8). Окрім цього, я передбачив мережевий комутатор MCSU053FN0 (D2) (рис. 4.9), який об'єднує ПЛК, сенсорну панель оператора HMISTU855 (D3) (рис. 4.10) та зовнішню SCADA-систему в єдину локальну мережу Industrial Ethernet.

При виборі став захисної апаратури (автоматичних вимикачів QF) використовуємо аналітичний розрахунок та обґрунтування їх параметрів. Визначення номінальних струмів трифазних асинхронних двигунів виконуємо за базовим електротехнічним рівнянням:

$$I_n = \frac{P_n}{\sqrt{3}U_n \cos \varphi \eta}. \quad (4.1)$$

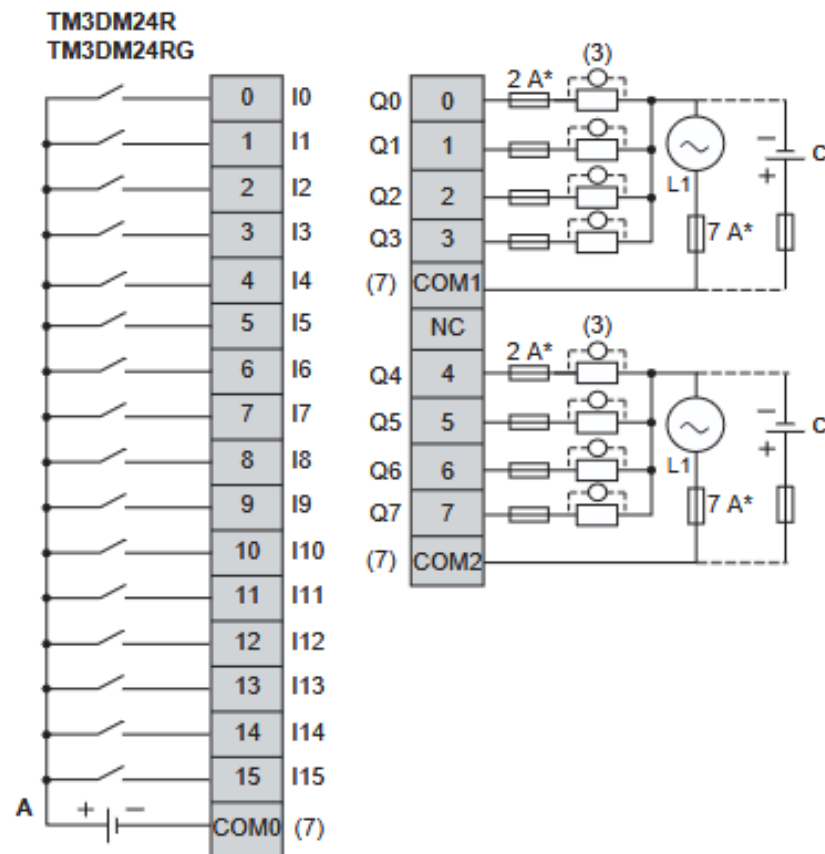


Рисунок 4.8 – Типова схема підключення до модуля розширення TM3DM24R



Рисунок 4.9 – Зовнішній вигляд некерованого мережевого комутатора MCSESU053FN0

Для двигунів вентиляції M1 та M2 з номінальною потужністю $P_{n1} = 2200$ Вт, при напрузі мережі $U_{n1} = 380$ В, коефіцієнті потужності $\cos \varphi_1 =$

0.82 та коефіцієнті корисної дії $\eta_1 = 0.83$, розрахований за формулою (4.1) струм склав 4.93 А. Керуючись умовою: $I_{thermal_min} \leq I_{n1} \leq I_{thermal_ma}$ для надійного захисту від тривалих теплових перевантажень, було обрано автомати захисту двигуна типу GV2ME10 із діапазоном уставки 4–6.3 А.



Рисунок 4.10 – Зовнішній вигляд сенсорної панелі HMISTU855

Для циркуляційних насосів М3 – М5 потужністю $P_{n3} = 750$ Вт ($\cos \varphi_3 = 0.78$; $\eta_3 = 0.75$) результат обчислення за (4.1) склав 1,95 А. Для захисту цих агрегатів я вибрав автомати вимикачі GV2ME07 із робочим діапазоном теплового розчеплювача 1.6...2.5 А, де струм уставки фіксується на позначці 1.95 А. Малопотужний привід системи зашторювання М6 із параметрами $P_{n6} = 90$ Вт ($\cos \varphi_6 = 0.70$; $\eta_6 = 0.60$) має номінальний струм 0.32 А. Для лінії цього двигуна я передбачив автомат GV2ME03 з діапазоном налаштування 0.25...0.4 А. Для захисту однофазного кола керування автоматика мною передбачено двополюсний автомат QF7 типу iK06N із номінальним струмом 6 А та характеристикою відключення типу С, що гарантує надійне відсікання струмів короткого замикання з урахуванням пускових кидків вхідних кіл імпульсного блока живлення. Усі розраховані та вибрані мною компоненти комутації та захисту зібрано до підсумкової інженерної специфікації обладнання шафи автоматики (табл. 4.1).

**Таблиця 4.1 – Специфікація електротехнічного обладнання та елементів
принципових схем системи мікроклімату**

Позиційне позначення	Найменування, заводське маркування (тип)	Точні технічні характеристики (струми, котушки, уставки, корпуси)	Кількість, шт.
1	2	3	4
U1, U2	Частотний перетворювач Schneider Electric Altivar ATV310 (ATV310HU22N4E)	Номинальна потужність: 2.2 кВт; вхідна напруга: 3 фази 380...460 В АС, 50/60 Гц; номінальний вихідний струм: 5.5 А; інтерфейс керування: Modbus RTU (RJ45); ступінь захисту корпусу: IP20.	2
QF1, QF2	Автомат захисту двигуна Schneider Electric TeSys GV2 (GV2ME10)	Трифазний; діапазон налаштування теплового розчеплювача: 4.0...6.3 А (уставка струму: 4.93 А); струм магнітного відсікання короткого замикання: 78 А; монтаж: на DIN-рейку; корпус: IP20.	2
QF3, QF4, QF5	Автомат захисту двигуна Schneider Electric TeSys GV2 (GV2ME07)	Трифазний; діапазон налаштування теплового розчеплювача: 1.6...2.5 А (уставка струму: 1.95 А); струм магнітного відсікання короткого замикання: 33.5 А; монтаж: на DIN-рейку; корпус: IP20.	3
QF6	Автомат захисту двигуна Schneider Electric TeSys GV2 (GV2ME03)	Трифазний; діапазон налаштування теплового розчеплювача: 0.25...0.4 А (уставка струму: 0.32 А); струм магнітного відсікання короткого замикання: 5.0 А; монтаж: на DIN-рейку; корпус: IP20.	1
QF7	Автоматичний вимикач Schneider Electric Acti9 iK06N (A9F18206)	Двополюсний (2P); номінальний струм: 6 А; захисна характеристика (крива відключення): тип C; гранична вимикальна здатність: 6 кА; монтаж: на DIN-рейку; модуль завширшки 36 мм.	1
KM1, KM2, KM3	Магнітний контактор Schneider Electric TeSys D (LC1D09BL)	Триполюсний силовий контактор; номінальний робочий струм: 9 А (у категорії АС-3, до 380 В); напруга котушки керування: 24 В DC (низькоспоживаюча серія, 2.4 Вт, із вбудованим діодом розрядження завад); корпус: IP20.	3
KM4	Реверсивна збірка контакторів Schneider Electric TeSys D (LC2D09P7)	Здвоєний контактор із заводу з вбудованим механічним та електричним взаємоблокуванням; номінальний струм: 9 А (категорія АС-3); напруга котушок керування: 230 В АС, 50/60 Гц; монтаж: DIN-рейка / панель.	1

Прод. табл. 4.1

1	2	3	4
D1.1	Програмований логічний контролер Schneider Electric Modicon M251 (TM251MESE)	Напруга живлення: 24 В DC; процесорне ядро автоматики; інтерфейси зв'язку: 2 порту RJ45 (вбудований комутатор Ethernet/IP, Modbus TCP), 1 порт RJ45 (Serial Modbus RTU/ASCII RS485), порт mini-USB; корпус на DIN-рейку.	1
D1.2, D1.3	Модуль розширення дискретних сигналів Schneider Electric Modicon TM3 (TM3DM24R)	Змішаний модуль; 16 дискретних входів (тип Sink/Source, 24 В DC) та 8 дискретних виходів (електромеханічні реле, комутація до 2 А, 240 В AC / 30 В DC); підключення гвинтовими клемми.	2
D1.4, D1.5	Модуль розширення аналогових входів Schneider Electric Modicon TM3 (TM3TI4)	4 високоточні аналогові входи; підтримувані сигнали: термоперетворювачі опору Pt100/Pt1000 (ТСП), термопари (J, K, T), уніфіковані сигнали напруги 0–10 В та струму 4–20 мА; роздільна здатність: 16 біт.	2
D1.6, D1.7, D1.8	Модуль розширення аналогових каналів Schneider Electric Modicon TM3 (TM3AM6)	Змішаний аналоговий модуль; 4 аналогові входи та 2 аналогові виходи; формати вихідних сигналів керування: напруга 0...10 В DC або струм 4...20 мА; роздільна здатність виходів: 12 біт.	3
D2	Промисловий мережевий комутатор Schneider Electric ConneXium (TCSESU053FN0)	Некерований (Unmanaged switch); 5 портів зв'язку типу 10/100 Base-TX (роз'єми RJ45); напруга живлення: 24 В DC (подвійне резервоване введення); монтаж: на DIN-рейку; металевий корпус IP30.	1
D3	Сенсорна панель оператора Schneider Electric Harmony ST6 (HMIST6400)	Графічний HMI-інтерфейс; кольоровий резистивний TFT-екран 7 дюймів (роздільна здатність 800x480); інтерфейси: 1xEthernet, 1xCOM1 (RS-232/485), USB тип A/mini-B; живлення: 24 В DC; монтаж у виріз панелі дверей шафи.	1
D1.17, D1.18, D1.19	Електропривод триходового клапана Belimo серії LR (LR24A-SR)	Плавне аналогове керування (сигнал позиціонування: 0...10 В DC); робочий крутний момент: 5 Нм; напруга живлення: 24 В AC/DC; час ходу: 150 с; ступінь захисту корпусу приводу: IP54.	3
D1.20, D1.21	Електропривод віконних фрамуг / заслінок Belimo (NV24A-SR)	Лінійний привод для систем вентиляційних вікон; керування: аналогове плавного типу 0...10 В DC; номінальне лінійне зусилля: 450 Н; хід штока: до 100 мм; напруга живлення: 24 В AC/DC; корпус: IP54.	2
YA1, YA2, YA3	Соленоїдний (електромагнітний) клапан Danfoss серії EV220B (032U7115)	Двопозиційний відсічний клапан типу 2/2; нормально закритий (НЗ); приєднання: внутрішня різьба G 1/2; у комплекті з котушкою BB024D (напруга котушки: 24 В DC, потужність споживання: 10 Вт).	3

4.2. Розробка алгоритмів функціонування системи керування мікрокліматом.

Практична інженерна реалізація теоретично обґрунтованих законів автоматичного керування у промислових контролерах безпосередньо залежить від детальної алгоритмізації та структурування режимів роботи проектованої системи. Створене алгоритмічне забезпечення цифрового комплексу стабілізації мікроклімату базується на концепціях детермінованості та багаторівневої ієрархії, що гарантує сувору послідовність виконання обчислювальних операцій у межах кожного робочого циклу центрального процесора. Верхній ієрархічний рівень представлений координаційним алгоритмом, який здійснює первинне конфігурування апаратних модулів, циклічний збір інформації з аналогових та дискретних каналів, фільтрацію й перевірку вірогідності вимірних технологічних параметрів, а також забезпечує безперебійне перемикання між автоматичним, операторським та аварійним режимами функціонування. Математичне обчислення регулюючих впливів покладається на рекурентні дискретні рівняння пропорційно-інтегрально-диференціального закону керування, де величина вихідного сигналу на поточному кроці дискретизації визначається на основі поточного значення відхилення регульованої величини від уставки та ретроспективних даних про похибку системи.

Реалізація контуру стабілізації температурного режиму передбачає лінійне перерахування вихідної величини дискретного регулятора у широтно-імпульсний сигнал, призначений для комутації виконавчих пристроїв нагрівання. Значно вищою архітектурною складністю характеризується підсистема регулювання відносної вологості повітряного середовища, в яку інтегровано логічну процедуру розділення діапазону регулювання (Split-range control). Залежно від знака та абсолютного значення обчисленого на поточному такті керуючого впливу $u_h[k]$, алгоритм здійснює безумовне розгалуження обчислювальної логіки, ініціюючи роботу системи дрібнодисперсного форсуночного зволоження при дефіциті вологи або активуючи сервоприводи

вентиляційних фрамуг для інтенсифікації природного повітрообміну в разі перезволоження внутрішнього об'єму споруди (рис. 4.11). Для мінімізації взаємного впливу контурів у загальну структуру алгоритму введено динамічну компенсаційну ланку, яка коригує задане значення температури під час відкриття кватирок, що запобігає різкому охолодженню повітря та температурному шоку рослинної маси через проникнення зовнішніх повітряних потоків.

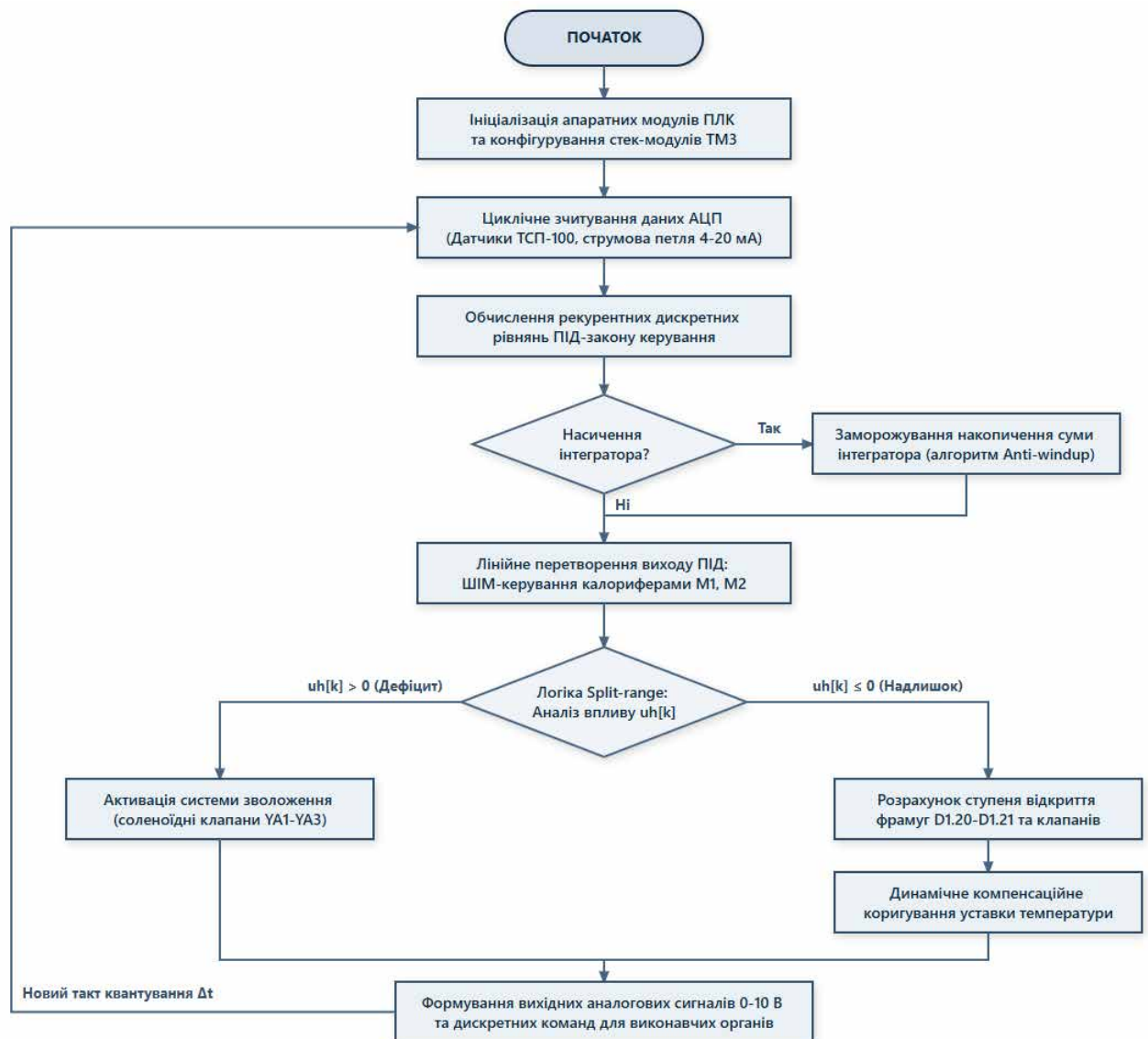


Рисунок 4.11 – Граф-схема загального алгоритму функціонування двоконтурної цифрової системи мікроклімату теплиці

Критично важливою компонентою розробленого програмно-алгоритмічного забезпечення є підсистема запобігання інтегральному

насиченню, відома як Anti-windup, що інтегрована в обидва канали автоматичного регулювання. За умов тривалих або значних за амплітудою зовнішніх чи внутрішніх збурень, коли виконавчі механізми досягають своїх фізичних обмежень і залишаються у повністю відкритому чи закритому стані, класична інтегральна складова ПД-закону починає неперервно та необмежено накопичувати помилку неузгодженості [11-12]. Наслідком цього явища є виникнення великих динамічних перерегулювань та затяжних коливань під час повернення технологічного процесу в задану робочу зону. Впроваджена модифікація алгоритму здійснює штучне блокування подальшого інтегрування похибки у випадку, коли розрахований керуючий сигнал досягає максимального або мінімального рівня обмеження, що суттєво підвищує загальну динамічну стійкість та оптимізує характер перехідних процесів у замкненій системі автоматичного керування.

4.3. Програмна реалізація алгоритмів керування у середовищі розробки ПЛК.

Технічне втілення розробленого комплексу алгоритмів автоматичного регулювання виконано у спеціалізованому інженерному середовищі проектування EcoStruxure Machine Expert (SoMachine), що забезпечує повну сумісність із міжнародним стандартом IEC 61131-3. Під час створення прикладного програмного забезпечення для мікропроцесорного контролера Modicon M251 (модель TM251MESE, позиційне позначення D1.1) було застосовано комбіновану технологію програмування, яка базується на спільному використанні двох мов різного рівня абстракції: структурованого тексту (ST – Structured Text) та функціональних блокових діаграм (FBD – Functional Block Diagram) [19]. Текстова мова ST завдяки своїй гнучкості та високій швидкодії була обрана як базовий інструмент для написання математично містких фрагментів коду, обчислення дискретних різницевих рівнянь ПД-регуляторів та реалізації розгалуженої некомутативної логіки Split-range. Графічна мова FBD виявилася найбільш ефективною для виконання

процедур конфігурування фізичних каналів модулів розширення серії Modicon TM3, побудови системного контуру обробки та тиражування сигналів аварійних умов, а також для організації мережевих протокольних інтерфейсів із верхніми рівнями ієрархії керування. Двоканальна архітектура людино-машинного інтерфейсу передбачає паралельну взаємодію контролера з локальним рівнем оперативного моніторингу на базі сенсорної панелі Harmony HMISTU855 (елемент D3), функціональне наповнення якої розроблено в середовищі EcoStructure Operator Terminal Expert, та з верхнім диспетчерським рівнем на базі SCADA-системи AVEVA Plant SCADA, архітектура мнемосхем якої повністю повторює структуру технологічних вузлів об'єкта.

Розроблене програмне забезпечення функціонує в детермінованому циклічному режимі з фіксованим тактовим періодом квантування $\Delta t = 100$ мс, що гарантує стабільність динамічних властивостей цифрових регуляторів. Загальна структура проекту розділена на ізольовані програмні модулі (POU), виклик яких упорядковано всередині головного циклічного завдання PLC_PRG. При кожному скануванні процесора першочергово запускається підпрограма фільтрації та масштабування аналогових величин, що надходять від температурних датчиків ТСП-100 (елементи D1.9–D1.14) та трансмітерів вологості EE160-HT (елементи D1.15–D1.16) через спеціалізовані аналогові модулі TM3TI4 та TM3AM6. Алгоритм первинної обробки здійснює апроксимацію нелінійних характеристик термоперетворювачів та виконує цифрове експоненціальне згладжування для нейтралізації високочастотних завад у лініях зв'язку (рис. 4.12). Обчислення керуючих впливів контурів температури та вологості винесено в окремі екземпляри функціональних блоків PID_TEMP та PID_HUMID, параметричні коефіцієнти яких параметризовані через глобальні змінні програми, що дозволяє виконувати їхнє оперативне коригування як локально з панелі оператора, так і віддалено зі SCADA-системи. Отримані значення керуючих сигналів трансформуються в команди керування частотними перетворювачами Altivar ATV310 (U1, U2) для зміни продуктивності вентиляторів змішування повітря калориферів M1 та M2, а

також передаються на дискретні релейні виходи модулів TM3DM24R для комутації контакторів циркуляційних насосів KM1–KM3 та реверсивного пускача KM4 приводу механізму зашторювання M6.

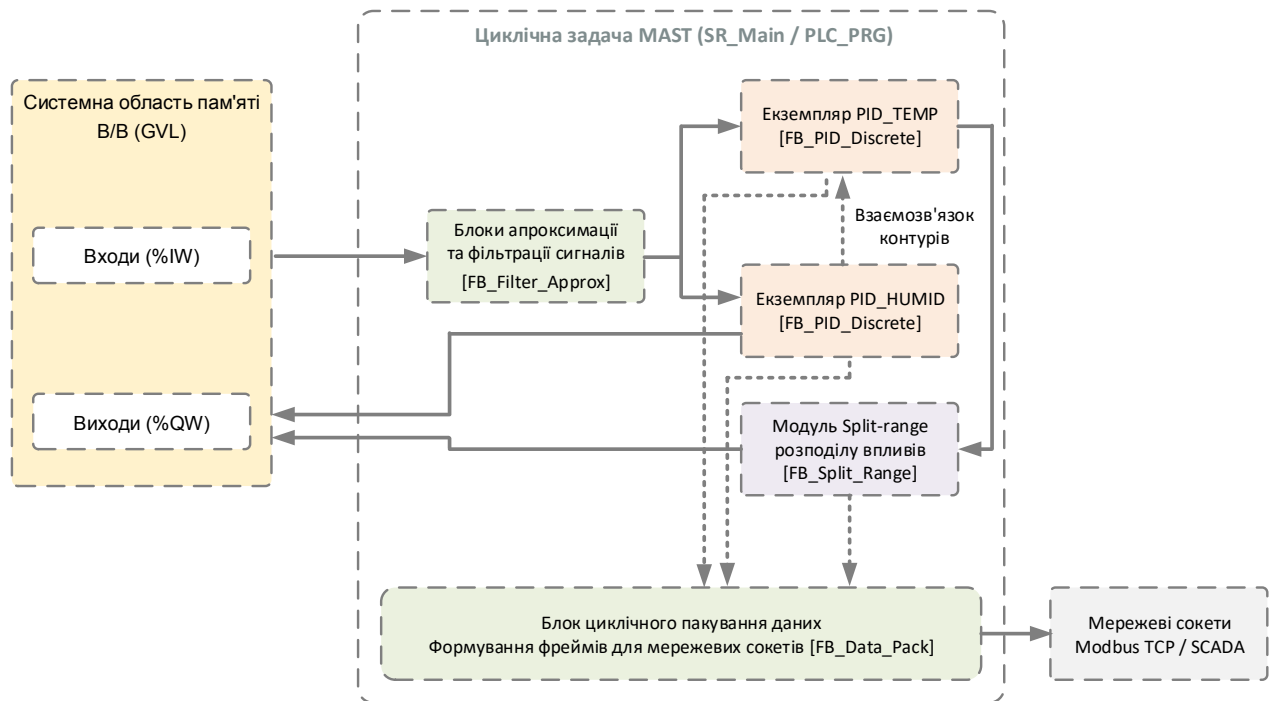


Рисунок 4.12 – Архітектура програмного забезпечення ПЛК та структура виклику функціональних блоків

Для забезпечення інформаційної інтеграції між обчислювальними підпрограмами контролера та двома незалежними точками операторського керування була спроектована єдина структурована карта адрес промислових регістрів. Обмін даними між ПЛК, сенсорною панеллю HMISTU855 та диспетчерським пунктом AVEVA Plant SCADA здійснюється по мережі Ethernet через промисловий некерований комутатор ConneXium (елемент D2) з використанням прикладного протоколу Modbus TCP [18]. Усі ключові змінні процесу, включаючи виміряні параметри мікроклімату, поточні уставки, розраховані ПІД-сигнали та виконавчих сервоприводів Belimo (D1.17–D1.21), відображені на архітектурі 16-бітних регістрів зберігання (Holding Registers). Організація пам'яті виконана таким чином, що зчитування критичних параметрів для візуалізації на графічних екранах обох рівнів інтерфейсу

виконується груповими Modbus-запитами у фоновому режимі операційної системи ПЛК. Це дозволяє уникнути додаткових затримок у роботі основного обчислювального ядра, забезпечує високу щільність мережевого трафіку та гарантує ідентичність відображення поточної ситуації в теплиці як на локальному пульті біля шафи автоматики, так і на моніторі віддаленого інженера-технолога. Графічний дизайн екранних форм SCADA-системи та панелі оператора базується на функціональній схемі, відтворюючи реальне просторове розташування калориферів, фрамуг, контурів ґрунтового підігріву та соленоїдних клапанів Danfoss (YA1–YA3), що спрощує сприйняття інформації персоналом при виникненні позаштатних ситуацій (рис. 4.13).

Таблиця 4.2 – Фрагмент карти адрес промислових реєстрів ПЛК для обміну даними

Символьне ім'я змінної ПЛК	Тип даних IEC	Адреса реєстра Modbus TCP	Напрямок (HMI / SCADA)	Технологічне призначення в системі мікроклімату
1	2	3	4	5
rGreenhouse_Temp_Avg	REAL	40001	Read Only	Поточна усереднена температура повітря в рослинній зоні, °C
rGreenhouse_Humid_Avg	REAL	40003	Read Only	Поточна відносна вологість внутрішнього повітря теплиці, %
rSoil_Temperature	REAL	40005	Read Only	Температура ґрунтового субстрату від датчиків ТСП-100, °C
rSetPoint_Temperature	REAL	40007	Read / Write	Задана оператором уставка температурного режиму, °C
rSetPoint_Humidity	REAL	40009	Read / Write	Задана оператором уставка відносної вологості повітря, %
wPID_Output_Heating	WORD	40011	Read Only	Поточний вихідний сигнал регулятора опалення для ШІМ, 0–10000
rControl_Signal_Humid	REAL	40013	Read Only	Розрахований вихід контуру вологості для логіки Split-range, %
rBelimo_Valves_Pos	REAL	40015	Read Only	Ступінь відкриття триходових клапанів опалення Belimo LR24A-SR, %

Прод. табл. 4.2

1	2	3	4	5
rBelimo_Windows_Pos	REAL	40017	Read Only	Поточний кут відкриття фрамуг природної вентиляції Belimo, %
wFrequency_U1_Status	WORD	40019	Read Only	Фактична вихідна частота обертання вентилятора М1 з ПЧ Altivar, Гц
wFrequency_U2_Status	WORD	40021	Read Only	Фактична вихідна частота обертання вентилятора М2 з ПЧ Altivar, Гц
xSystem_Auto_Mode	BOOL	40100 (Bit 0)	Read / Write	Прапорець активації автоматичного режиму роботи всієї системи
xEmergency_Stop_Active	BOOL	40100 (Bit 1)	Read Only	Сигнал спрацювання ланцюга аварійної зупинки (кнопки SB2, SB4, SB5)
xMotor_M3_Status	BOOL	40100 (Bit 2)	Read Only	Дискретний статус роботи насоса теплоносія калорифера (контактор КМ1)
xMotor_M5_Status	BOOL	40100 (Bit 3)	Read Only	Дискретний статус роботи насоса геотермального контуру (контактор КМ3)
xShading_Up_Active	BOOL	40100 (Bit 4)	Read Only	Сигнал ходу механізму зашторювання М6 у напрямку відкриття (КМ4.1)
xShading_Down_Active	BOOL	40100 (Bit 5)	Read Only	Сигнал ходу механізму зашторювання М6 у напрямку закриття (КМ4.2)
xDanfoss_YA1_Status	BOOL	40100 (Bit 6)	Read Only	Стан соленоїдного відсічного клапана першої зони зволоження
xAlarm_GV2_Tripped	BOOL	40100 (Bit 7)	Read Only	Узагальнена аварія за зворотним зв'язком автоматів захисту QF1–QF6

4.4. Проектування людино-машинного інтерфейсу та SCADA-системи моніторингу.

Диспетчерський та локальний рівні ієрархічної структури створеної автоматизованої системи керування базуються на застосуванні сучасних засобів людино-машинного інтерфейсу (HMI) та розгалуженого програмного комплексу SCADA (рис. 4.13). Головним призначенням цього масиву є наочна

графічна інтерпретація фізичного стану об'єкта, забезпечення оперативного операторського втручання в контури автоматичного регулювання, а також ведення структурованих баз даних для довгострокового збереження параметричної історії процесу.

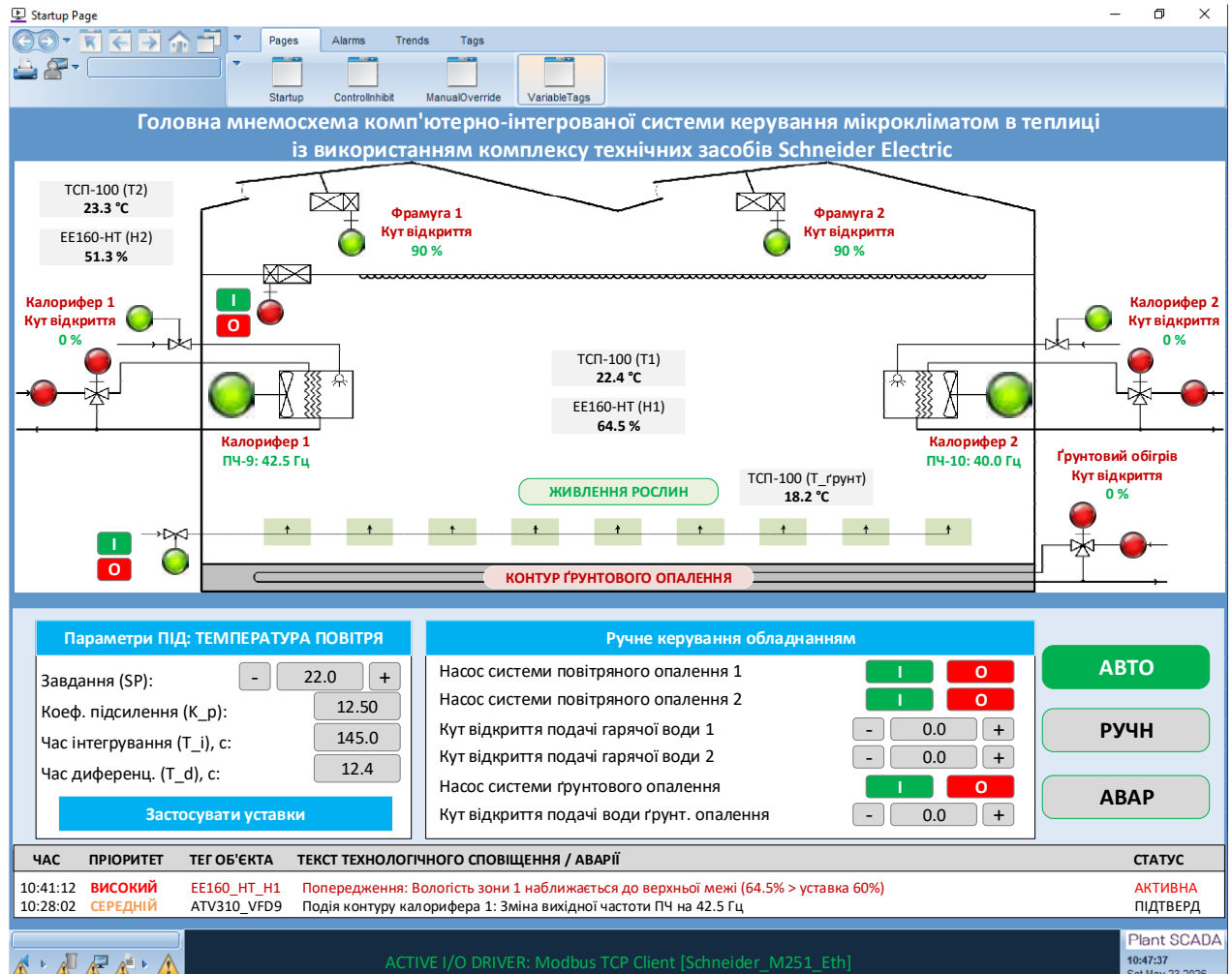


Рисунок 4.13 – Головна мнемосхема оператора SCADA-системи диспетчеризації мікроклімату теплиці

При розробці прикладних графічних екранів для локальної сенсорної панелі Harmony HMISTU855 у середовищі EcoStruxure Operator Terminal Expert (рис. 4.14) та віддаленого диспетчерського пункту в AVEVA Plant SCADA було суворо дотримано методологічних рекомендацій індустріального стандарту ANSI/ISA-101. У межах цієї концепції впроваджено принципи «ситуаційної обізнаності», які передбачають застосування нейтрального сіро-декоративного фону та мінімізацію яскравих елементів. Такий підхід суттєво зменшує зорове

навантаження на обслуговуючий персонал протягом робочої зміни та гарантує моментальну фіксацію уваги на колірних маркерах відхилень або аварійних флуктуацій параметрів. Базовим візуальним вузлом виступає інтерактивна загальносистемна мнемосхема, що відображає архітектуру захищеного ґрунтового комплексу з динамічною векторизацією повітряних мас, поточним кутом відкриття вентиляційних кватирок та триходових клапанів Belimo, а також точними числовими індикаторами температурно-вологісних полів.

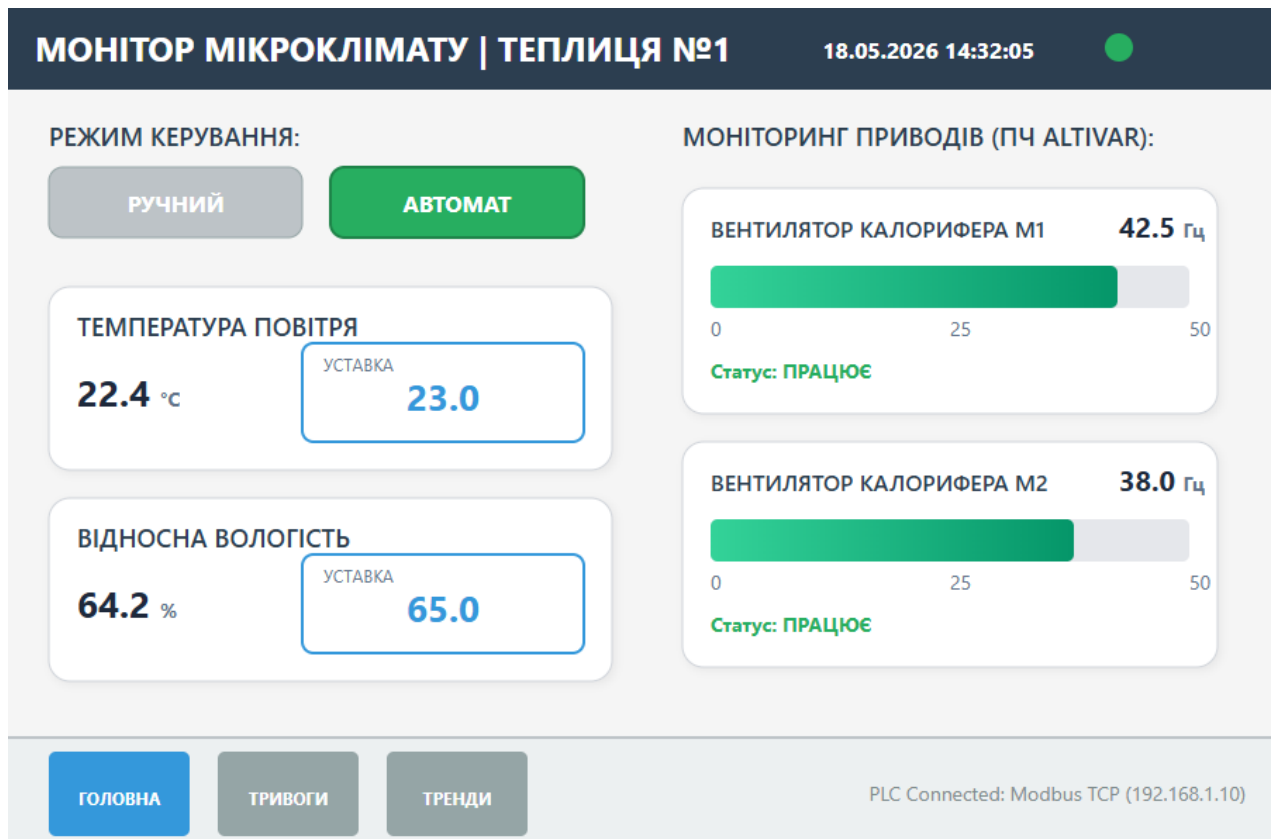


Рисунок 4.14 – Екран оперативного моніторингу локальної панелі керування Harmony HMISTU855

Обмін масивами даних між обчислювальною станцією автоматизованого робочого місця (АРМ) диспетчера, де розгорнуто AVEVA Plant SCADA, сенсорною панеллю HMISTU855 та центральним мікропроцесорним контролером Modicon M251 організовано за допомогою мережевої топології Industrial Ethernet через комутаційне обладнання ConneXium. Опитування внутрішнього буфера пам'яті ПЛК, що містить карту адрес Modbus TCP, оптимізовано за часовими інтервалами відповідно до

значної теплової та вологостійної інерційності повітряного об'єму теплиці, завдяки чому виключається виникнення критичних пікових навантажень на мережевий стек контролера [18]. Важливою функціональною підсистемою розробленого програмного забезпечення є модуль графічних трендів. Цей інструмент дозволяє будувати суміщені часові діаграми динаміки зміни температури та відносної вологості, паралельно накладаючи на них вектори динамічних технологічних уставок та граничні зони допустимого дрейфу. Зазначена візуалізація дає змогу інженерно-технічному персоналу безпосередньо оцінювати статичну точність та показники якості функціонування синтезованих алгоритмів регулювання Split-range та цифрових ПД-модулів.

Критично важливим компонентом проектування людино-машинного інтерфейсу є підсистема інтелектуального менеджменту тривог і технологічних повідомлень (табл. 4.3). Будь-які позаштатні виходи вимірюваних параметрів за межі регламентованих коридорів, а також сигнали про деструктивні апаратні несправності (такі як втрата зв'язку з температурними датчиками за коротким замиканням лінії або аварійне вимкнення автоматів захисту двигунів вентиляторів QF1–QF2) підлягають автоматичній класифікації за трьома ієрархічними рівнями пріоритетності: попереджувальний, критичний та катастрофічний аварійний. У разі ініціалізації події найвищого рангу програмний комплекс негайно дублює візуальний маркер звуковою сигналізацією, здійснює транзакційний запис часової мітки та ідентифікатора події до реляційного SQL-архіву історичних логів, а також автоматично генерує на передній план операторського екрана покроковий алгоритм дій для дежурного інженера. Таке рішення мінімізує тривалість ідентифікації поломок, локалізує розвиток системних аварій та повністю нівелює негативний вплив суб'єктивного людського фактора на безпеку вегетації вирощуваних агрокультур.

Таблиця 4.3 – Матриця конфігурування аварійних повідомлень та технологічних тривог

Назва аварійного тегу	Текст повідомлення (HMI / SCADA)	Клас пріоритету	Уставка спрацювання / Логічна умова активації
ALM_TE_01_HH	Критично висока температура повітря (Зона 1)	High	Температура ≥ 32 °C
ALM_TE_01_H	Попередження: Температура вище норми (Зона 1)	Medium	Температура ≥ 28 °C
ALM_TE_01_LL	Критично низька температура повітря (Зона 1)	High	Температура ≤ 12 °C
ALM_RH_01_HH	Критично висока вологість повітря	Medium	Відносна вологість ≥ 90 %
ALM_RH_01_LL	Критично низька вологість повітря	High	Відносна вологість ≤ 40 %
ALM_TS_01_HH	Перегрів кореневої системи (Температура ґрунту)	High	Температура ґрунту ≥ 25 °C
FLT_SENS_TE	Відмова датчика EE160-HT (Обрив/Коротке замикання)	High	Аналоговий сигнал < 3.8 мА або > 20.5 мА
FLT_SENS_TS	Відмова датчика температури ґрунту (ТСП-100)	Medium	Опір < 80 Ом або > 150 Ом
FLT_VFD_ATV310	Аварія ПЧ Altivar 310: Перевантаження двигуна	High	Дискретний вхід DI_VFD_FLT = TRUE
FLT_PWR_HEAT	Збій живлення привода контуру опалення (Belimo)	Medium	Допоміжний контакт автомата Q_HEAT_FB = FALSE
FLT_PWR_VENT	Відключення силового ланцюга вентиляції	High	Спрацювання мотор-автомата Q_VENT_FB = FALSE
FLT_VALVE_JAM	Помилка позиціонування клапана (Danfoss)	Medium	Команда відкриття = TRUE AND Датчик потоку = FALSE (затримка 10 с)
FLT_NET_COMM	Втрата зв'язку ПЛК з локальною панеллю (HMI)	Low	Тайм-аут опитування по Modbus TCP > 5 с

РОЗДІЛ 5. ЕКОНОМІЧНА ЕФЕКТИВНІСТЬ СИСТЕМИ АВТОМАТИЗАЦІЇ

5.1. Розрахунок капітальних витрат на проектування та впровадження системи.

Економічна доцільність впровадження розробленої комп'ютерно-інтегрованої системи керування мікрокліматом теплиці визначається шляхом розрахунку сумарних капітальних інвестицій. Капітальні витрати на створення та введення в експлуатацію апаратно-програмного комплексу автоматизації формуються як сума вартостей технічного забезпечення, базового програмного забезпечення, а також витрат на проектні, монтажні та пусконаладжувальні роботи. Математично загальна сума одноразових капітальних вкладень визначається за базовим економічним рівнянням:

$$K_{\Sigma} = K_{\text{обл}} + K_{\text{ПЗ}} + K_{\text{проект}} + K_{\text{монт}} + K_{\text{ПН}}, \quad (5.1)$$

де $K_{\text{обл}}$ – витрати на придбання засобів автоматизації;

$K_{\text{ПЗ}}$ – вартість ліцензійного програмного забезпечення;

$K_{\text{проект}}$ – вартість інженерного проектування;

$K_{\text{монт}}$ – витрати на електромонтажні роботи;

$K_{\text{ПН}}$ – витрати на пусконаладжувальні роботи.

Базовою та найбільш об'ємною статтею витрат є придбання технічних засобів автоматизації, що суворо регламентуються розробленою специфікацією обладнання. До складу цієї групи входять програмований логічний контролер Modicon M251, модулі розширення аналогового вводу-виводу TM3, локальна сенсорна панель оператора Harmony HMISTU855, а також силові частотні перетворювачі Altivar 310 для керування рециркуляційними вентиляторами. Польовий рівень представлений високоточними давачами температури та вологості серії EE160 від E+E Elektronik, термоопорами ТСП-100 для ґрунту, а також виконавчими механізмами: поворотними приводами триходових клапанів Belimo LR24A-SR-LA та електромагнітними клапанами Danfoss EV220B. Розрахунок вартості

комплектуючих базується на актуальних ринкових цінах офіційних дистриб'юторів станом на період проектування (табл. 5.1). Вартість апаратних засобів обчислюється як сума добутків ціни одиниці обладнання на їх необхідну кількість з урахуванням транспортно-заготівельних витрат:

$$K_{\text{обл}} = \sum_{i=1}^n (N_i P_i) (1 + \kappa_{\text{ТЗ}}), \quad (5.2)$$

де N_i – кількість одиниць обладнання i -го типу, необхідних для повної комплектації системи;

P_i – актуальна ринкова ціна одиниці обладнання;

$\kappa_{\text{ТЗ}}$ – коефіцієнт транспортно-заготівельних витрат, який у сучасних ринкових умовах приймається на рівні 0.05...0.08.

Таблиця 5.1 — Кошторисна вартість апаратного забезпечення системи керування мікрокліматом

№	Назва обладнання	Тип	Кількість	Ціна/шт	Ціна
1	Програмований логічний контролер	TM251MESE	1	26276.00	26276.00
2	Датчик вологості EE160-НТ	EE160-НТ	2	13575.00	27150.00
3	Електропривод триходових клапанів	Belimo LR24A-SR	3	9503.00	28509.00
4	Електропривод віконних фрамуг	Belimo SH (450 Н)	2	10680.00	21360.00
5	Модуль розширення	TM3DM24R	2	10745	21490.00
6	Модуль розширення	TM3TI4	2	8364	16728.00
7	Модуль розширення	TM3AM6	3	12 471	37413.00
8	Датчик температури	ТСР-100	6	1 400	8400.00
9	Промисловий комутатор	MCSESU053FN0	1	7 502	7502.00
10	Сенсорна панель	HMISTU855	1	38953.00	38953.00
11	Блок живлення постійного струму	HDR-30-24	1	689.00	689.00
12	Лампа сигнальна зелена	AD22-22DS 220 В	7	51.00	357.00
13	Лампа сигнальна зелена	AD22-22DS 24 В	8	51	408.00
14	Контактор	LC1D09BL	3	2 751	8253.00
15	Контактор реверсний	LC2D09P7	1	5800.00	5800.00
16	Проміжне реле	PTF11A LY3 24 В	5	221.00	1105.00
17	Автоматичний вимикач двигуна	GV2ME10	2	2831.00	5662.00
18	Автоматичний вимикач двигуна	GV2ME07	3	2831.00	8493.00
19	Автоматичний вимикач двигуна	GV2ME03	1	2454.00	2454.00
20	Автоматичний вимикач	iK06N	1	243.00	243.00
21	Перемикач з нульовим положенням	XB4	1	526.00	526.00
22	Кнопка без фіксації "Старт" зелена	XB5AA35	2	523.00	1046.00
23	Пост одномісний "АВАРІЙНИЙ СТОП"	XAL-D174	3	157.00	471.00
24	Кнопка подвійна "Старт/Стоп"	TB5-AL8425	6	156.00	936.00
25	Перетворювач частоти	ATV310HU22N4E	2	17670.00	35340.00
26	Соленоїдний клапан Danfoss	EV220B 15B	3	7872.00	23616.00
	Всього				329180.00

Разом з тим, на поточному етапі проектування точне індивідуальне оцінювання витрат на оплату праці розробників, монтажні послуги та спеціалізовані ліцензії є неможливим через високу мінливість ринкових тарифів інжинірингових компаній та індивідуальний характер ліцензійних угод, що прямо залежать від умов кінцевого контракту. З огляду на зазначене обмеження, сукупний обсяг капітальних вкладень визначається шляхом розрахунку точної вартості специфікованого обладнання, яка виступає незмінним базисом, та інтегрального врахування інших статей через укрупнені нормативні коефіцієнти:

$$K_{\Sigma} = K_{\text{обл}} + K_{\text{дод}} = 329\,180.00 + 82\,295.00 = 411\,475.00 \text{ грн}, \quad (5.3)$$

де $K_{\text{дод}}$ – сукупні додаткові витрати на проектування, програмне забезпечення та монтаж, які через неможливість точного прямого розрахунку приймаються як фіксована частка від вартості апаратного комплексу (приймаємо 25 %).

Отримане в результаті детальної калькуляції підсумкове значення капітальних вкладень виступає вихідною базою для подальшого розрахунку річного економічного ефекту, експлуатаційних витрат та терміну окупності розробленого проекту. Системний підхід до вибору компонентної бази, який полягає у застосуванні надійних промислових рішень середнього та високого цінових сегментів від компаній Schneider Electric, Belimo та Danfoss, дозволяє оптимально збалансувати початкові фінансові інвестиції з мінімізацією майбутніх витрат на технічне обслуговування, гарантуючи при цьому високу безвідмовність безперервного технологічного процесу вирощування овочевих культур у закритому ґрунті.

5.2. Розрахунок терміну окупності та інтегральних показників економічної ефективності.

Фінальним етапом інженерного проектування комп'ютерно-інтегрованої системи є оцінювання її фінансової спроможності, що базується на зіставленні початкових інвестиційних витрат із очікуваними

експлуатаційними витратами та чистим грошовим потоком, що генерується після введення комплексу в дію. Повна величина капітальних вкладень у реалізацію системи розраховується з урахуванням базової вартості технічних засобів автоматизації (411475.00 грн), торгівельно-транспортних витрат із коефіцієнтом 0,11 (45262.25 грн), монтажу обладнання з коефіцієнтом 0.17 (69950.75 грн), прокладання кабельних проводок протяжністю 150 метрів (2650.50 грн), а також інших непередбачених капітальних витрат у розмірі 2 % (8229.50 грн) (табл. 5.2). Інтеграція цих складових визначає сумарний обсяг капітальних інвестицій на рівні 537568.00 грн. Паралельно з формуванням капітальної основи проекту розраховується баланс річних експлуатаційних витрат, які забезпечують стабільне функціонування системи. Загальні річні поточні витрати складають 355663.68 грн і об'єднують у собі амортизаційні відрахування (80635.20 грн при коефіцієнті 0.15), витрати на проведення поточних ремонтів (96762.24 грн при коефіцієнті 0.18), витрати на споживання електричної енергії автоматикою потужністю 1.46 кВт протягом 2880 годин роботи (5466.24 грн при тарифі 1.3), а також фонд оплати праці обслуговуючого персоналу у кількості двох осіб із загальною річною сумою 172800.00 грн.

Економічна ефективність від впровадження засобів автоматизації формується головним чином завдяки оптимізації технологічних процесів та зниженню впливу людського чинника на біотехнічний об'єкт. Загальний чистий прибуток від функціонування системи становить 170467.20 грн на рік. Цей інтегральний показник складається з двох ключових джерел економії, серед яких визначальним є фінансовий ефект від оптимізації робочих місць та зменшення чисельності виробничого персоналу, що забезпечує прибуток у розмірі 168307.20 грн. Додатковий позитивний внесок досягається завдяки прецизійному регулюванню параметрів вологості та температури повітря, що мінімізує обсяги бракованої продукції та приносить 2160.00 грн за умови цільового зростання економічного ефекту від підвищення якості на 0.01 %. Для комплексної оцінки доцільності інвестування у розробку використовується критерій зведених витрат, який об'єднує поточні експлуатаційні витрати з

капітальними вкладеннями, приведеними до одного року за допомогою нормативного коефіцієнта ефективності. Математична формалізація цього показника описується класичним рівнянням:

$$З = C_{\text{експ}} + E_{\text{н}} K_{\text{кап}}, \quad (5.4)$$

де $C_{\text{експ}}$ – річні експлуатаційні витрати системи автоматизації;

$K_{\text{кап}}$ – повна сума капітальних інвестицій у проект;

$E_{\text{н}}$ – нормативний коефіцієнт ефективності капіталовкладень, який для галузі приладобудування та автоматизації приймається на рівні 0.15.

Таблиця 5.2 – Зведені техніко-економічні показники проекту системи автоматизації мікроклімату теплиці

	Розрахункові значення	Од.	Відповідний коефіцієнт	Значення
1	Загальна вартість технічних засобів автоматизації			411475.00
2	Торгівельно-транспортні витрати		0.11	45262.25
3	Витрати на монтаж технічних засобів		0.17	69950.75
4	Витрати на прокладення проводок	150	17.67	2650.5
5	Інші капітальні витрати 2%		0.02	8229.5
6	Капітальні витрати			537568
7	Відрахування на амортизацію		0.15	80635.2
8	Витрати на поточний ремонт		0.18	96762.24
9	Витрати на енергоресурси		1.3	5466.24
	потужність автоматизації	1.46		
	кількість годин роботи	2880		
10	Витрати на оплату праці персоналу			172800
	кількість персоналу	2		
	ставка оператора	30		
11	Річні експлуатаційні витрати			355663.68
12	Зведені витрати		0.15	436298.88
13	Чистий прибуток			170467.2
	прибуток за рахунок зменшення персоналу			168307.2
	прибуток за рахунок зменшення браку			2160
	економія за рахунок підвищення якості	0.01%		
14	Термін окупності САК			3.153498151

Підстановка розрахованих значень у вираз $(355663.68 + 0.15 \cdot 537568.00)$ визначає підсумковий обсяг зведених витрат на рівні 436298.88 грн.

Ключовим інтегральним індикатором, що визначає період, за який капітальні вкладення повністю компенсуються згенерованим чистим

прибутком, є термін окупності системи автоматичного керування. Розрахунок цього параметра здійснюється як відношення сумарних початкових інвестицій до величини річного чистого прибутку:

$$T_{\text{ок}} = \frac{K_{\text{кап}}}{P_{\text{чист}}}, \quad (5.5)$$

де $P_{\text{чист}}$ щорічний чистий прибуток, отриманий внаслідок впровадження комп'ютерно-інтегрованого комплексу.

Проведений математичний розрахунок показує, що термін окупності розробленої системи становить 3.15 року.

ВИСНОВКИ

В кваліфікаційній магістерській роботі було проведено дослідження технологічного процесу формування мікроклімату в тепличному комплексі, як об'єкта керування та розроблено комп'ютерно-інтегровану систему автоматичного керування температурно-вологісним режимом із використанням комплексу технічних засобів Schneider Electric.

Створено математичну модель для дослідження теплофізичних та масообмінних процесів у внутрішньому просторі споруди закритого ґрунту на основі диференціальних рівнянь теплового та вологісного балансу. Використовуючи математичний процесор MATLAB/Simulink, проведено аналіз динаміки і визначено передатні функції об'єкта автоматизації за каналами регулювання температури та відносної вологості повітря. На основі проведених досліджень вибрано ПД-закон регулювання параметрами мікроклімату теплиці та обґрунтовано застосування принципу безударного керування суміжними виконавчими механізмами опалення й вентиляції.

Розроблено проект функціональної схеми автоматизації системи керування, де центральним пристроєм обробки інформації, логічного керування та регулювання служить програмований логічний контролер Modicon TM251MESE. Створено комплекс прикладного програмного забезпечення середнього рівня, розроблено графічний людино-машинний інтерфейс для локальної сенсорної панелі Harmony HMISTU855, а також спроектовано систему диспетчерського моніторингу, архівації та трендування верхнього рівня на базі платформи AVEVA Plant SCADA. Розроблено принципову електричну схему, схеми з'єднань та підключень польового обладнання, датчиків, частотних перетворювачів Altivar 310 та виконавчих приводів.

Економічні розрахунки показали доцільність впровадження комп'ютерно-інтегрованої системи керування мікрокліматом в теплиці, оскільки строк її окупності складає 3.15 року.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Good Agricultural Practices for Greenhouse Vegetable Crops / Food and Agriculture Organization of the United Nations. Rome : FAO, 2013.
2. Plant Factory: An Indoor Vertical Farming System for Efficient Quality Food Production / ed. by T. Kozai, G. Niu, M. Takagaki. Academic Press, 2016.
3. Bakker J. C., Bot G. P. A. Greenhouse Climate Control: An Integrated Approach. Wageningen, 1995.
4. Потапенко Д. В., Грищенко В. О. Комп'ютерно-інтегрована система керування мікрокліматом в теплиці із використанням комплексу технічних засобів Schneider Electric. Енергозабезпечення, електротехнології, електротехніка та інтелектуальні управляючі системи в АПК : матеріали 79-ї наук.-практ. конф. студентів. Київ, 2026. С. 191.
5. Дудник А. О. Особливості побудови системи керування біотехнічним об'єктом з урахуванням природних збурень (на прикладі споруд закритого ґрунту). Збірник наукових праць Кіровоградського національного технічного університету. Техніка в сільськогосподарському виробництві, галузеве машинобудування, автоматизація. 2012. Вип. 25 (2). С. 292–297.
6. Природні збурення біотехнічних об'єктів, їх моделювання та прогнозування / В. П. Лисенко, Б. Головінський, В. Решетюк та ін. Київ : НУБіП України, 2014.
7. Лисенко В. П. Автоматизація технологічних процесів у закритому ґрунті. Київ : Енергетика і автоматика АПК, 2014.
8. Innovative and Reliable Climate Computers for Greenhouses and Storage Areas. Official Technical Specifications and System Architecture Guide [Електронний ресурс] / SERCOM Control Systems B.V. Nijmegen, Netherlands, 2025. URL: <https://www.sercom.nl/en/>.
9. Priva Connoisseur & Priva Compass: Integrated process computer for climate, energy and water management in horticulture. Technical Reference Manual [Електронний ресурс] / Priva Holding B.V. De Lier, Netherlands, 2024. URL:

<https://www.priva.com/horticulture/>.

10. HortiMaX-CX500: The modular and adaptive climate and water computer for mid-sized and large-scale greenhouse complexes. User Guide and Algorithm Specification [Електронний ресурс] / Ridder Group, HortiMaX. Maasdijk, Netherlands, 2023. URL: <https://ridder.com/systems/>.
11. Грищенко В. О., Степаненко С. П., Грищенко І. Ю. Комп'ютерно-інтегровані технології автоматизації : навч. посіб. Київ : НУБіП України, 2025. 240 с.
12. Astrom K. J., Hagglund T. Advanced PID Control. ISA – The Instrumentation, Systems, and Automation Society, 2006. 460 p.
13. Isermann R. Digital control systems. Springer Science & Business Media, 2013. 566 p.
14. Modicon M251 Logic Controller. Hardware Guide [Електронний ресурс] / Schneider Electric. 2025. URL: <https://www.se.com/ua/uk/product-range/62124-modicon-m251/> (назва з екрана).
15. Modicon TM3 - Analog I/O Modules. Hardware Guide [Електронний ресурс] / Schneider Electric. 2024. URL: <https://www.se.com/eg/en/download/document/EIO0000003131/> (назва з екрана).
16. Altivar Easy 310. Variable speed drives for asynchronous motors. User manual [Електронний ресурс] / Schneider Electric. 2024. URL: <https://www.se.com/ua/uk/product-range/61845-altivar-easy-310/> (назва з екрана).
17. Humidity and Temperature Sensor for Building Automation. EE160 Series [Електронний ресурс] / E+E Elektronik. 2024. URL: <https://resources.amphco.com/static/datasheets/e-e-elektronik/ee160-m1t2a6.pdf> (назва з екрана).
18. Technical data sheet LR24A-SR-LA Rotary actuator [Електронний ресурс] / Belimo Automation AG. 2024. URL: https://www.belimo.com/mam/general-documents/datasheets/en-gb/belimo_LR24A-SR-LA_datasheet_en-gb.pdf

(назва з екрана).

19.ДСТУ EN 61131-3:2014. Контролери програмовані. Частина 3. Мови програмування.