

НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ БІОРЕСУРСІВ
І ПРИРОДОКОРИСТУВАННЯ УКРАЇНИ

ННІ ЕНЕРГЕТИКИ, АВТОМАТИКИ І ЕНЕРГОЗБЕРЕЖЕННЯ

УДК 681.5:631.234

ПОГОДЖЕНО

Директор ННІ енергетики,
автоматики і енергозбереження
(назва ННІ)

ДОПУСКАЄТЬСЯ ДО ЗАХИСТУ

Завідувач кафедри автоматики
та робототехнічних систем
ім. акад. І.І. Мартиненка
(назва кафедри)

_____ В.В. Каплун
(підпис) (ПІБ)

_____ О.О. Опришко
(підпис) (ПІБ)

«__» _____ 2024 р.

«__» _____ 2024 р.

КВАЛІФІКАЦІЙНА МАГІСТЕРСЬКА РОБОТА

02.06.-КМР.2071"С".2024.11.20.001.ПЗ

на тему **«КОМП'ЮТЕРНО-ІНТЕГРОВАНА СИСТЕМА
АВТОМАТИЗАЦІЇ ПОДАЧІ ВУГЛЕКИСЛОГО ГАЗУ В
ПРОМИСЛОВУ ТЕПЛИЦЮ»**

Спеціальність:

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

Освітньо-професійна програма:

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

Гарант освітньої програми

_____ І.М. Болбот, д.т.н., професор
(підпис) (П.І.Б, науковий ступінь та вчене звання)

Виконав

_____ Д.О. Бабак
(підпис) (П.І.Б студента)

Керівник магістерської роботи

_____ С.А. Шворов, д.т.н., професор
(підпис) (П.І.Б, науковий ступінь та вчене звання)

КИЇВ-2024

НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ БІОРЕСУРСІВ
І ПРИРОДОКОРИСТУВАННЯ УКРАЇНИ
ННІ ЕНЕРГЕТИКИ, АВТОМАТИКИ І ЕНЕРГОЗБЕРЕЖЕННЯ

ЗАТВЕРДЖУЮ
Завідувач кафедри
автоматики та робототехнічних
систем ім. акад. І.І. Мартиненка
О.О. Опришко
«__» _____ 2024 р.

ЗАВДАННЯ
ДО ВИКОНАННЯ КВАЛІФІКАЦІЙНОЇ МАГІСТЕРСЬКОЇ РОБОТИ СТУДЕНТУ
(бакалаврської, дипломної)

Бабаку Дмитру Олексійовичу
(прізвище, ім'я, по-батькові)

Спеціальність:

174– «Автоматизація, комп'ютерно-інтегровані технології та робототехніка»
Освітньо-професійна програма:

Автоматизація, комп'ютерно-інтегровані технології та робототехніка

Тема магістерської роботи **«КОМП'ЮТЕРНО-ІНТЕГРОВАНА СИСТЕМА АВТОМАТИЗАЦІЇ ПОДАЧІ ВУГЛЕКИСЛОГО ГАЗУ В ПРОМИСЛОВУ ТЕПЛИЦЮ»**,

затверджена наказом ректора НУБіП України від 20.11.2024 року №2071 «С»
Термін подання студентом магістерської роботи 05.12.2024 року

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

Перелік питань, що підлягають дослідженню:

1. Аналіз технологічного процесу вирощування овочів у промисловій теплиці як об'єкта автоматизації.
2. Математичне моделювання процесу створення повітряно-газового середовища в теплиці.
3. Вибір регулятора та обґрунтування параметрів його налаштувань.
4. Розробка цифрової системи керування.
5. Схеми системи автоматизації.
6. Економічна оцінка ефективності САК підживленням рослин CO₂ в теплиці.

Дата видачі завдання «20» листопада 2024 року

Керівник магістерської роботи _____
(Підпис)

Шворов С.А.
(Прізвище та ініціали)

Завдання прийняв до виконання _____
(Підпис)

Бабак Д.О.
(Прізвище та ініціали)

ЗМІСТ

Перелік умовних позначень	5
Вступ	6
РОЗДІЛ 1. Аналіз технологічного процесу вирощування овочів у промисловій теплиці як об'єкта автоматизації	9
1.1. Фотосинтетична діяльність рослини	9
1.2. Вплив підживлення вуглекислим газом на продуктивність вирощування рослин у теплиці	12
1.3. Технологічні системи забезпечення параметрів мікроклімату в промисловій теплиці	17
1.4. Улаштування системи обігріву та підживлення рослин вуглекислим газом	22
1.5. Нормативні значення параметрів мікроклімату в промисловій теплиці для вирощування овочів	27
1.6. Розробка функціональної схеми автоматизації системи керування підживленням вуглекислим газом в теплиці	30
РОЗДІЛ 2. Математичне моделювання процесу створення повітряно-газового середовища в теплиці	32
2.1. Математичне моделювання процесу переносу і асиміляції двоокису вуглецю в культиваційному приміщенні	32
2.2. Визначення передатної функції СЗГ по каналу регулювання концентрації CO ₂	39
РОЗДІЛ 3. Вибір регулятора та обґрунтування параметрів його налаштувань	43
3.1. Обґрунтування вибору алгоритму керування	43
3.2. Реалізація алгоритму керування	44
3.2.1. Вибір програмованого логічного контролера	45
3.2.2. Вибір датчика концентрації вуглекислого газу в теплиці	47
3.2.3. Вибір виконавчого механізму САК підживленням вуглекислим газом в теплиці	51
3.2.4. Вибір датчика рівня сонячної радіації	54
3.2.5. Вибір контрольно-захисного пристрою CO/NO	56
РОЗДІЛ 4. Розробка цифрової системи керування	58
4.1. Час квантування цифрової системи керування	58
4.2. Реалізація цифрового ПІ-регулятора	60
4.3. Дослідження цифрової системи керування на стійкість та якість	62
РОЗДІЛ 5. Схеми системи автоматизації	64

5.1. Розробка схеми електричної принципової системи керування підживленням рослин вуглекислим газом	64
5.2. Розробка схеми електричної з'єднань САК підживленням рослин вуглекислим газом в теплиці	67
5.3. Розробка схеми електричної підключень САК підживленням рослин вуглекислим газом в теплиці	70
5.4. Вибір апаратів захисту та керування	72
5.5. Вибір проводів та кабелів	76
5.6. Вибір щита керування	77
5.7. Розробка засобів візуалізації технологічного процесу	78
РОЗДІЛ 6. Економічна оцінка ефективності САК підживленням рослин CO ₂ в теплиці	81
Висновки	86
Література	87
Додатки	89

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ

- АТФ – аденозинтрифосфорна кислота, або аденозинтрифосфат
- КТЗ – комплекс технічних засобів
- НАДФ*Н – нікотинамідаденіндинуклеотидфосфат
- ПВГ – підживлення вуглекислим газом
- САР – система автоматичного регулювання
- СЗГ – споруда захищеного ґрунту
- ФАР – фотосинтетично активна радіація
- ЦСК - цифрова система керування
- SCADA - Supervisory Control And Data Acquisition – диспетчерське управління і збір даних

ВСТУП

Актуальність теми. Однією з характерних особливостей споруд захищеного ґрунту (СЗГ), як правило, є достатня забезпеченість рослин елементами мінерального живлення, водою та тепловою енергією, а концентрація CO_2 і освітленість рослин часто виступають в ролі *лімітуючих* факторів. Це пов'язано з обмеженим повітрообміном СЗГ із зовнішньою атмосферою, яка є основним постачальником двоокису вуглецю, який асимілюється рослинами у денний час доби.

Однією з найважливіших властивостей рослинного покриву є його адаптивний характер поведінки при зміні факторів навколишнього середовища. У наш час відомі два принципи саморегулювання рослин, які діють у різних масштабах часу: "повільний" – такий, що протікає за програмою, заданою спадковими факторами, "швидкий" – в залежності від поточних значень факторів навколишнього середовища. Строгої теорії росту рослин на даний час все ще формується. В основі моделювання продукційного процесу лежать концептуальні моделі, а біологічною основою управління процесами формування врожаю є закономірності фотосинтетичної продуктивності листя зелених рослин. Найчастіше продуктивність рослин характеризують швидкістю реакції відновлення двоокису вуглецю, яка залежить як від концентрації CO_2 , так і від інтенсивності фотосинтетично активної радіації.

Дослідження газодинамічних особливостей та систем вуглекислотного підживлення показують, що принципи регулювання процесів газообміну в повітрі СЗГ, в основному, визначаються його теплофізичними властивостями. Однак, особливості CO_2 -газообміну досліджені недостатньо, що обмежує можливість подальшого удосконалення процесу подачі CO_2 у промислові культивацийні споруди. Деякі з відомих моделей газодинаміки CO_2 в культивацийних спорудах не враховує світлозалежну зміну потоку CO_2 , що

споживається рослинами, інші не дозволяють врахувати обмеження ефективності вуглекислотного підживлення за рахунок непродуктивних витрат CO_2 у зовнішнє середовище.

У наш час підживлення вуглекислим газом у промислових теплицях є обов'язковим агрозаходом. В сучасних тепличних комплексах, поряд із регулюванням теплових та вологісних параметрів мікроклімату, передбачаються технічні можливості для збагачення повітря вуглекислим газом. Найбільш доступним та економічним джерелом CO_2 визнане використання відпрацьованих газів котелень. У цьому випадку постає необхідність захисту від подачі до теплиць у складі димових газів таких продуктів горіння, як угарного газу CO та окису азоту NO . Для вирішення складних задач зменшення собівартості продукції та збільшення продуктивності виробництва у СЗГ необхідно використовувати системи регулювання концентрації CO_2 в теплицях із урахуванням інших факторів навколишнього середовища.

Тому актуальною задачею є удосконалення алгоритмів та систем регулювання концентрації двоокису вуглецю в атмосфері СЗГ, використання яких дозволить більш повно використовувати адаптивні властивості конкретного виду вирощуваних рослин.

Метою кваліфікаційної магістерської роботи є розробка системи автоматичного керування підживлення рослин вуглекислим газом в теплиці, що забезпечить підвищення продуктивності процесу виробництва овочевої продукції в спорудах захищеного ґрунту.

Для цього необхідно розв'язати наступні *задачі*:

- дослідити вплив факторів навколишнього середовища на зростання і розвиток овочевих культур, зокрема особливості CO_2 -газообміну рослин і культивативної споруди в процесі вуглекислотного підживлення;

- обґрунтувати режим роботи системи автоматичного керування оптимальними значеннями концентрації CO_2 у повітрі промислової теплиці;

- обґрунтувати вибір комплексу сучасних технічних засобів

автоматики для реалізації САК підживленням рослин вуглекислим газом із захистом від потрапляння у простір теплиці шкідливих складових димових газів (чадного газу (CO) та оксиду азоту (NO));

- провести техніко-економічну оцінку ефективності САК концентрацією CO₂ в спорудах захищеного ґрунту.

Об'єктом дослідження є процес керування параметрами мікроклімату у промислових теплицях для вирощування овочів.

Предметом дослідження є зв'язки та закономірності продуктивності виробництва овочевої продукції від режиму роботи системи вуглекислового підживлення.

РОЗДІЛ 1

АНАЛІЗ ТЕХНОЛОГІЧНОГО ПРОЦЕСУ ВИРОЩУВАННЯ ОВОЧІВ У ПРОМИСЛОВІЙ ТЕПЛИЦІ ЯК ОБ'ЄКТА АВТОМАТИЗАЦІЇ

1.1. Фотосинтетична діяльність рослини

Фотосинтез – процес перетворення сонячної енергії в хімічну, яка накопичується рослинами у вигляді поживних органічних речовин. Підсумковим рівнянням фотосинтезу є наступне [21]:



де $h\nu$ - промениста енергія Сонця (кванти світла).

Однак це рівняння відображає лише сумарний процес фотосинтезу, не розкриваючи його суті – перетворення зеленими рослинами променистої енергії Сонця в енергію хімічних зв'язків органічних речовин в результаті ланцюга окислювально-відновлювальних реакцій за участю хлорофілу, ряду ферментів, що формують основний універсальний "акумулятор" енергії – нуклеотид АТФ.

Основним матеріалом, що підтримує енергетичний процес, є універсальний оптичний сенсibilізатор – *хлорофіл*, вбудований у суміжні мембрани рослинних клітин, які забезпечують перетворення електромагнітної енергії сонячного випромінювання у хімічну енергію, що використовується для відновлення окислів вуглецю і азоту в реакціях первинного біосинтезу. Оскільки донором електронів для цих відновлювальних перетворень у рослин є вода, фотосинтез супроводжується з фотоокисленням води і звільненням молекулярного кисню, що є значущим процесом у формуванні та підтриманні кисневої атмосфери планети та забезпеченні озонового шару, який захищає Землю від руйнуючої дії космічної радіації з довжиною хвилі менше 300 нм. Незважаючи на різні чисельні значення, що наводяться різними дослідниками при оцінці глобального фотосинтезу, можна вважати, що щорічно у біосфері

зв'язується у реакціях фотосинтезу близько 250...400 млрд. т CO_2 , що еквівалентно утворенню 160...200 млрд. т органічної маси та 100...150 млрд. т кисню [17].

Зупинимось на деяких принципових моментах, важливих для розуміння впливу фізичних факторів на фотосинтез.

Процес фотосинтезу складається з двох стадій:

- на першій стадії фотосинтезу – *світловій*, що протікає за умов обов'язкової участі променистої енергії (квантів світла), за рахунок процесів руху електронів відбувається поступовий і плавний процес формування енергетично ємних молекул АТФ і коферменту НАДФ*Н та утворення газоподібного кисню;

- на другій стадії фотосинтезу – *темновій* – відбувається синтез складних органічних речовин (вуглеводів, білків та ін.), мінеральних речовин, що потрапляють через кореневу систему, та CO_2 з атмосфери (так званий карбоновий цикл Калвіна).

Світлова фаза названа так, щоб підкреслити залежність усіх реакцій, що в ній протікають, від світла. Деякі реакції *темнової* фази також залежать від світла, оскільки ферменти, що є каталізаторами цих реакцій, залежать від світла. Тому цю фазу часто називають не темною, а *циклом фіксації вуглецю* – за основним процесом, що в ній відбувається (відбувається фіксація не чистого вуглецю, а вуглецю у складі вуглекислого газу CO_2).

Не менш важливим є те, що цикл фіксації вуглецю як етап фотосинтезу – ланцюг термохімічних реакцій, інтенсивність яких буде залежати від температури навколишнього середовища. Тому виділяються як мінімум чотири основних фізичних фактори – **світло, температура, концентрація CO_2** у міжклітковому просторі листя та **вологозабезпечення**, що визначають цей важливий процес у рослині.

Умови **освітленості рослин** у теплицях залежать від багатьох факторів, зокрема від вибору ділянки, розміщення споруд, кута нахилу покрівлі, якості скла (або плівки), його забруднення, розміщення рослин у теплицях і т.п. Так,

наприклад, забрудненість скла може знизити освітленість до 30% [21]. Кут нахилу покрівлі 25-30° забезпечує найкращу освітленість протягом року, при куті >30° у теплиці може утворюватись тінь, крім того будівництво таких теплиць є більш матеріалоємним.

Температурний режим є одним з найважливіших факторів управління зростанням та плодоношенням рослини. Температура визначає інтенсивність таких процесів рослин, як фотосинтез, дихання, транспірація, переміщення речовин, метаболізм (сукупність процесів обміну речовин у живому організмі), зростання та плодоношення.

Температура, при якій рослини ростуть і розвиваються найбільш інтенсивно, є оптимальною. Відхилення від неї сповільнює ріст і розвиток рослин або згубно діє на них. Температура, нижче за яку ріст і розвиток припиняються, називається мінімальною, а та, вище за яку припиняються ті самі процеси – максимальною.

Температура повітря і температура ґрунту взаємно пов'язані. При низьких нічних температурах повітря в теплиці температура ґрунту повинна бути оптимальною, щоб забезпечити нормальну роботу коренів.

Повітряно-газовий режим. У природному середовищі у приґрунтовому шарі повітря міститься близько 21% кисню та 0,03% вуглекислого газу. Цей вміст газів є відносно постійним і підтримується на одному рівні в результаті ряду процесів, що протікають у ґрунті та над ним.

Коли атмосферні умови не перешкоджають проведенню інших агротехнічних заходів, підживлення CO₂ може проводитися і після полудня. Вентилювання проводять через годину після зупинки підживлення, щоб рослини мали змогу максимально використовувати додаткову кількість CO₂.

Численні дослідження показали, що збагачення повітря теплиці CO₂ позитивно і суттєво впливає на цвітіння, зав'язування плодів, ранньостиглість та загальний врожай.

Режим водо- та вологопостачання. Вода необхідна рослинам для розчинення мінеральних речовин і переміщення їх в організмі, а також для

регулювання температури та транспірації. Вимогливість культур до вологи ґрунту і повітря залежить від їх біологічних особливостей, розвитку кореневої системи, морфологічної й анатомічної будови надземних органів (стебла, листка), температури ґрунту і повітря, інтенсивності сонячного освітлення, забезпечення поживними речовинами, сили вітру і вологості повітря.

1.2. Вплив підживлення вуглекислим газом на продуктивність вирощування рослин у теплиці

У більшості випадків для оцінки інтенсивності росту рослин використовують показники інтенсивності фотосинтезу, мірою якого є кількість вуглекислого газу, яка була поглинена рослинами за одиницю часу на одиниці площі – $\frac{г CO_2}{м^2 \cdot год}$.

У природному середовищі у приґрунтовому шарі повітря міститься близько 21% кисню та 0,03% вуглекислого газу. Цей вміст газів є відносно постійним і підтримується на одному рівні в результаті ряду процесів, що протікають у ґрунті та над ним.

В звичайних умовах відкритого ґрунту рослини не відчувають недостатності в O_2 та CO_2 незважаючи на те, що деякі види рослин щоденно на площі 1га поглинають 500-600кг двоокису вуглецю, який вони дістають зі $100000м^3$ повітря. Завдяки неперервній циркуляції великих повітряних мас практично нерухомі рослини забезпечуються необхідною кількістю CO_2 . Дослідження показують, що в залежності від габітусу рослин, типу ґрунту та підживлення вміст CO_2 коливається: з 1га неудобреного піщаного ґрунту в атмосферу виділяється близько 2кг CO_2 , а з 1га ґрунту того ж типу, удобреного 40-60т гною, виділяється 15-25кг CO_2 [9].

В атмосфері СЗГ значні відхилення концентрації CO_2 обумовлені газообміном між рослиною і навколишнім середовищем внаслідок

фотосинтезу і дихання. Крім того, у зимові місяці при більш низькій температурі та обмеженій вентиляції приток CO_2 із атмосфери зменшується, що несприятливим чином відбивається на продуктивності рослин.

Ефективність додаткового збагачення повітря теплиці вуглекислим газом уперше досліджувалося у Германії наприкінці XIX – початку XX ст., а пізніше і в інших країнах.

Природна концентрація CO_2 в теплицях спостерігається короткочасно на початку дня в дуже похмурі та безвітряні дні. Зазвичай вночі вміст CO_2 досягає 0,05-0,1%, а вдень у процесі фотосинтезу CO_2 поглинається так швидко, що концентрація знижується менше 0,03%. Особливо низька концентрація CO_2 у теплицях, де овочеві культури вирощують на гідропоніці або у контейнерах із живильним субстратом, оскільки в цьому випадку відсутній ґрунт, із якого в результаті біологічних процесів виділяється CO_2 .

У дослідженнях Пає та Лійвака [21] встановлено, що при вирощуванні огірків на торфі вміст CO_2 є найменшим у період з 10 до 16 год. (рис. 1.1). Ці ж автори відмічали, що найбільша недостатність CO_2 спостерігається у березні – квітні у сонячну погоду (до 0,01%).

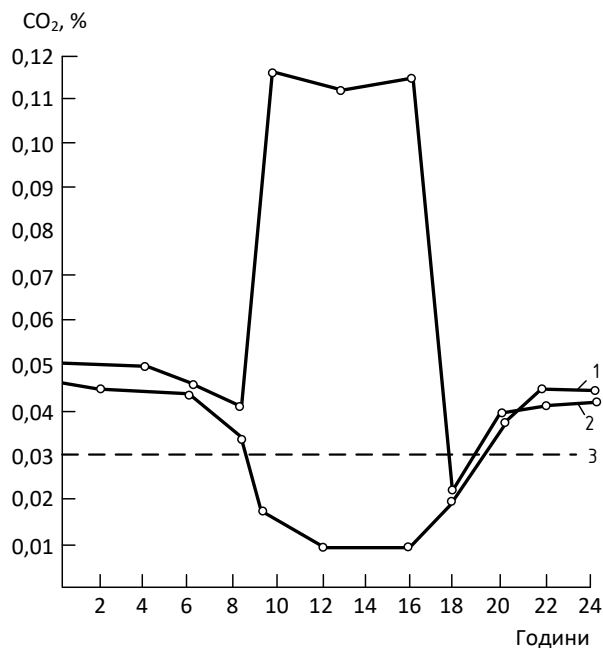


Рис. 1.1. Зміна вмісту CO_2 у повітрі теплиці:

1 – без підживлення CO_2 ; 2 – при підживленні CO_2 ; 3 – звичайний природний рівень CO_2 у навколишньому середовищі

Дослідження [9] в теплиці з культурою томата, свідчать про значні коливання у вмісті CO_2 (рис. 1.2). Найбільш низька концентрація у теплиці без підживлення CO_2 відмічена у полуденні години – 0,025-0,03%. Можна припустити, що при вирощуванні томата на ґрунті з нормальним вмістом органічної речовини вдень зберігається природний рівень вмісту CO_2 . Зазвичай через 1 год. після подачі CO_2 концентрація двоокису вуглецю досягає 0,1%, після чого починає знижуватися. Це пояснюється фотосинтетичною діяльністю листя, яка досягає максимуму між 10 та 11 год. Через годину після зупинки подачі концентрація CO_2 швидко знижується, досягає приблизно 0,04%, а після відкриття фрамуг знижується до природного рівня.

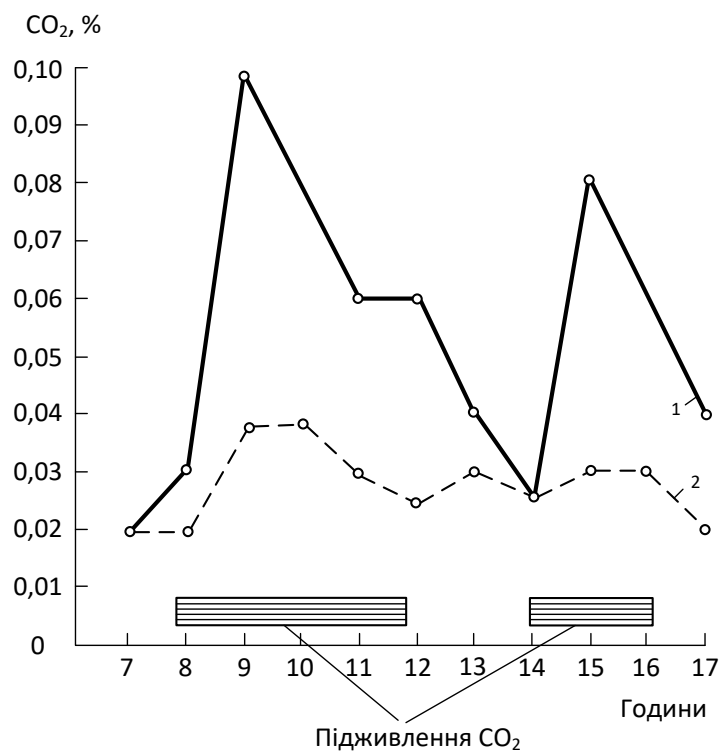


Рис. 1.2. Зміна вмісту CO_2 у повітрі теплиці в сонячний день:

1 – при підживленні CO_2 ; 2 – без підживлення CO_2

Концентрація CO_2 у СЗГ регулюється в залежності від *інтенсивності світла*. У результаті численних досліджень, проведених у країнах з розвинутим тепличним овочівництвом, встановлено, що при максимальній сонячній радіації найбільш ефективна концентрація CO_2 0,1-0,15%, причому подальше її підвищення є економічно недоцільним. Однак в Голландії вважається оптимальною концентрація до 0,2%. Дослідження в Данії показали,

що томати здатні ефективно використовувати CO_2 у концентрації до 0,22% [9]. При більш високій концентрації посилення утворення сухої речовини вже не відбувається. При високій концентрації CO_2 урожай знижується; так, при концентрації 0,32% урожай був нижчим, ніж у контролі. Згідно з дослідженнями ряду авторів [9], підживлення необхідно розпочинати в ранішні години при інтенсивності світла 1200-2000 лк. При ранньому виробництві томатів у теплиці підживлення рослин CO_2 у сонячну погоду у лютому можна розпочинати близько 8 год. 30 хв. Зазвичай у цей період в сонячну погоду інтенсивність світла в теплиці дорівнює 4000 лк, а 16 год. – близько 1360 лк. (рис. 1.3). Після лютого у зв'язку із збільшенням тривалості дня та посиленням сонячної радіації підживлення CO_2 починають із сходом сонця. Завдяки цьому дія підвищеної концентрації CO_2 співпадає з моментом відкриття продихів у ранкові години.

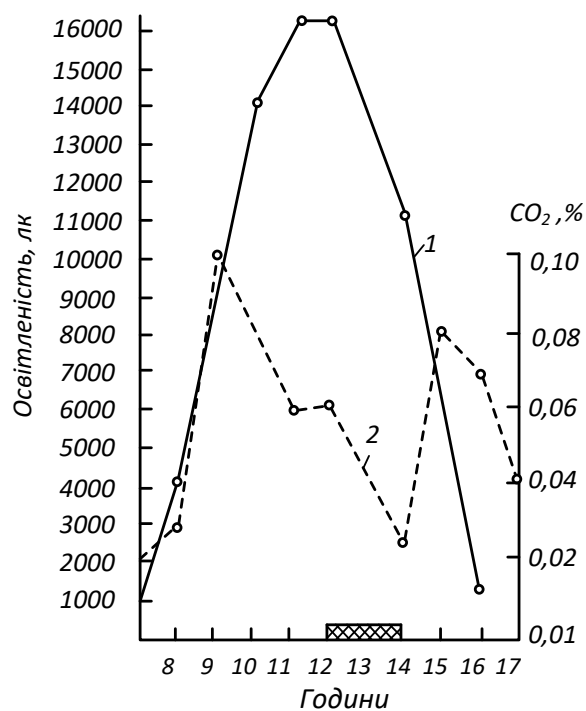


Рис. 1.3. Зміна освітленості (1) у сонячний день та зміна вмісту CO_2 (2) у результаті вентиляції з 12 до 14 год.

Залежність інтенсивності фотосинтезу від інтенсивності світла на прикладі огірка представлена на рис. 1.4.

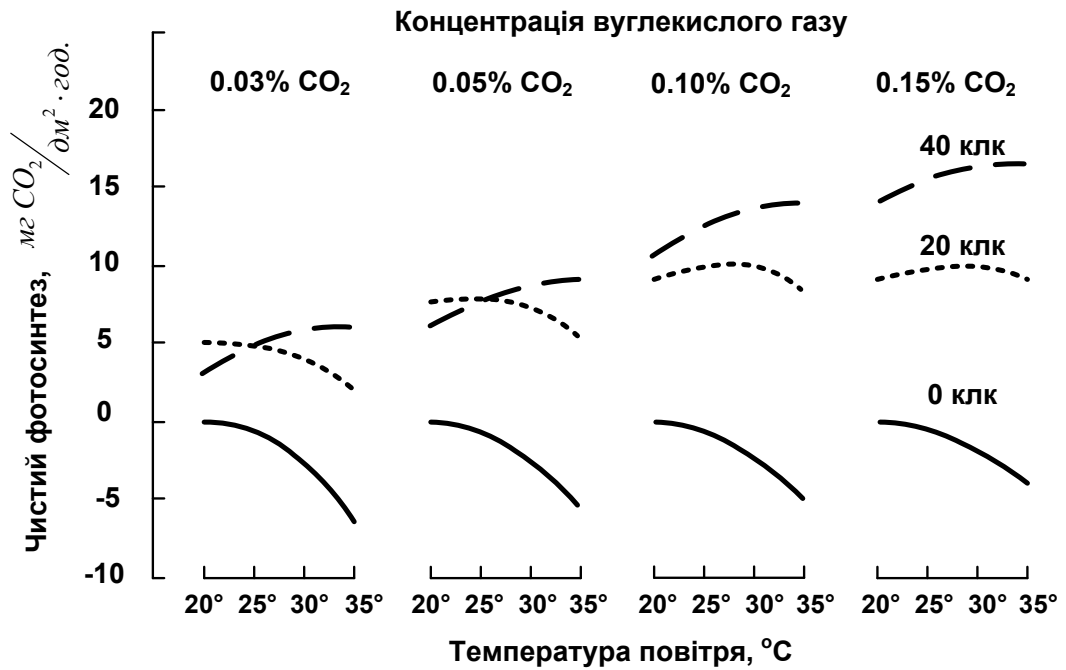


Рис. 1.4. Чистий фотосинтез рослин огірка в залежності від інтенсивності освітлення, температури та вмісту CO₂ у повітрі

Дослідження, проведені за кордоном, показують, що додаткове збагачення CO₂ підсилює ріст та пришвидшує розвиток рослин томату в теплиці у зимовий період навіть при набагато меншій інтенсивності світла, яка завдяки CO₂ частково компенсується.

Тривалість збагачення повітря теплиць CO₂ залежить виключно від освітленості (окрім випадків, коли підживлення здійснюється газогенератори, які спалюють природний газ безпосередньо у об'ємі теплиці; у цьому випадку необхідно враховувати температурний фактор). Для підживлення двоокисом вуглецю підходять усі ті години, коли не проводиться вентилявання. Вентилювання при підживленні доцільно починати дещо пізніше, оскільки температурний поріг рослин в умовах збільшеної концентрації CO₂ підвищується.

Коли атмосферні умови не перешкоджають проведенню інших агротехнічних заходів, підживлення CO₂ може проводитися і після полудня. Вентилювання проводять через годину після зупинки підживлення, щоб рослини мали змогу максимально використовувати додаткову кількість CO₂.

Численні дослідження показали, що збагачення повітря теплиці CO₂ позитивно і суттєво впливає на цвітіння, зав'язування плодів, ранньостиглість та загальний врожай.

У практиці тепличного виробництва томатів при погіршенні погоди після формування 5-го суцвіття можуть з'являтися недорозвинені квітки, а іноді й цілі суцвіття не досягають фази цвітіння. Багато дослідників вважають, що ці порушення можна попередити збільшенням концентрації CO₂ у цей період. Дослідження Калверта і Слека з чотирма концентраціями CO₂: 0,03%, 0,06%, 0,1% та 0,14% показали, що кількість плодів до 10-го суцвіття різко збільшується, при чому немає суттєвої різниці між варіантами з концентрацією 0,1 та 0,14%.

Збільшення врожаю тепличних овочів, за даними різних авторів, коливається у великих межах і залежить насамперед від сорту, техніки підживлення та умов навколишнього середовища. В проведених в США дослідях з 20-ма сортами томатів та огірків та двома рівнями концентрації CO₂ – 0,03 та 0,1% врожай в середньому був на 43% більшим, а середня маса плода – на 13% більша при підживленні CO₂. Уільямс (1966) та Беркет (1967) встановили, що при висадці розсади томату у січні – лютому і підживленні CO₂ ранньостиглість зростала на 90%, а загальний врожай – на 30-40%.

1.3. Технологічні системи забезпечення параметрів мікроклімату в промисловій теплиці

Сучасні промислові тепличні комплекси мають бути обладнані сукупністю автоматичних технічних систем (рис. 1.5) задля забезпечення необхідної ефективності протікання технологічних процесів вирощування та досягнення достатніх показників якості, обсягів та темпів виробництва овочевої й овочево-розсадної продукції рослинництва захищеного ґрунту [7].

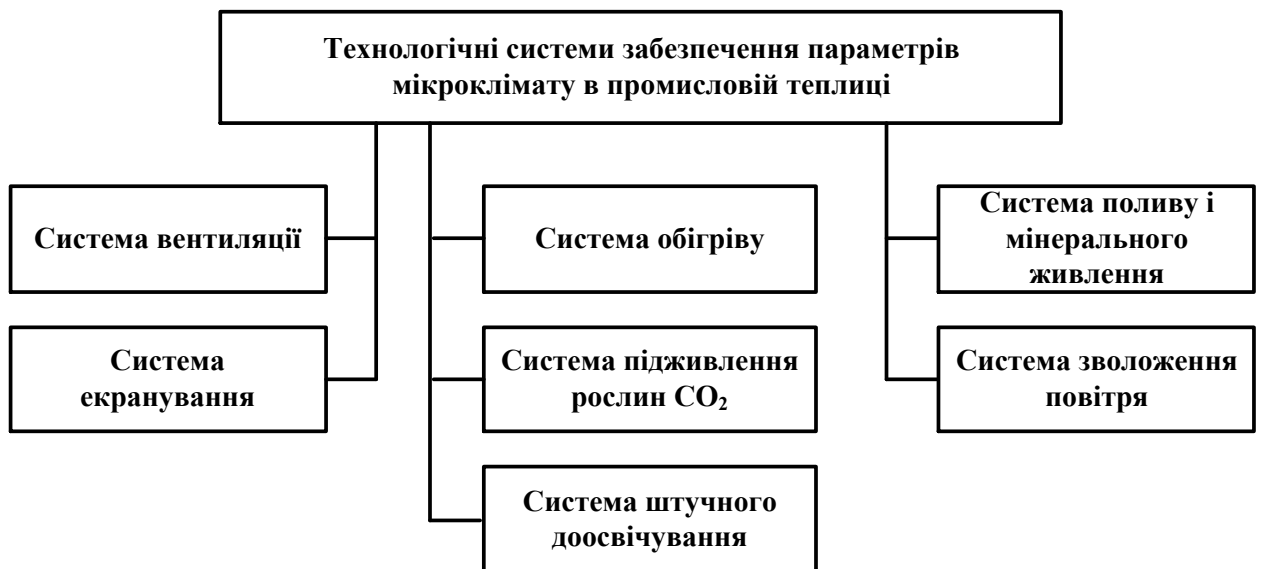


Рис. 1.5. Технологічні системи забезпечення параметрів мікроклімату в промисловій теплиці

Система вентиляції. На сьогоднішній день у промислових теплицях використовується два основні типи вентиляції: природна (пасивна) й механічна (активна). Природна вентиляція є прямим результатом створених перепадів тиску, що підтримується потоками вітру та / або температурними градієнтами. Придатність такого способу вентиляції в якості засобу охолодження зони вирощування теплиць повинна бути оцінена з обліком місцевих кліматичних умов, типів вирощуваних культур та інженерного дизайну теплиць. Будь-яка система природної вентиляції повинна мати засоби для повного або часткового регулювання температури всередині теплиці. Автоматизовані системи контролю природної вентиляції повинні бути обладнані сенсорами дощу та вітру, які дозволяють зашторювати вентиляційні отвори задля збереження врожаю [25].

Реакція рослин на значні денні коливання температури є достатньо різноманітною та складною, отже важко сформулювати чіткі рекомендації щодо вибору оптимального діапазону температури та швидкості її зміни. Відтворення оптимальних температур та динаміки її зміни є складним процесом, який потребує обліку біологічних факторів, а також оптимізації економічних витрат на відповідні енергоресурси. Отже, на підставі аналізу

світового досвіду з дослідження температурних режимів вирощування культур у тепличних умовах [25] встановлено наступні рекомендації:

- верхня межа для тепличних культур, для яких типовим є теплі кліматичні умови, має знаходитись на рівні від 30°C до 32°C за умови достатньої освітленості;

- верхня межа для тепличних культур, для яких типовим є тропічний клімат, має дорівнювати 35°C;

- верхня межа для тепличних культур, для яких типовим є холодний клімат, має дорівнювати 20°C за умови достатньої освітленості.

Традиційні інженерні рішення щодо проєктування систем механічної вентиляції теплиць залежать від швидкості та потужності видалення надлишкової теплової енергії зі зони вирощування культур.

Система екранування. На теперішній час існує цілий ряд методів та засобів затінення теплиць, які використовуються для зменшення температури в зоні вирощування. Найбільшого розповсюдження серед них набули: фарби, тканини, кольорові сітки, частково відбиваючі екрани, водяна плівка над дахом та рідка піна між стінками теплиці. Окремо необхідно зазначити сучасний спосіб *енергоефективного затінення* з використанням сонячних панелей, який здатний функціонувати в автоматичному режимі з обліком поточних кліматичних факторів. Кожен із зазначених способів має свої переваги та недоліки. Затінення, як правило, є найменш сприятливим рішенням для охолодження теплиць, оскільки це може вплинути на продуктивність через зменшення сонячної радіації, що, в свою чергу, призводить до зниження ефективності фотосинтезу рослин. Однак, затінення сприяє покращенню якості продукції шляхом збільшення фракції дифузного опромінення, що підвищує ефективність використання сонячної радіації.

Система штучного доосвічування. Достатня кількість світла є однією з основних умов ефективного вирощування рослин у теплицях. На теперішній час для штучного доосвітлення тепличних культур використовується ряд технологій, які мають певні переваги та недоліки, а саме:

– *ртутні лампи*: найбільш небезпечні для вирощування овочів у теплицях, проте вони покращують фотосинтез рослин через те, що спектр їх випромінювання є найбільш близьким до червоного світла;

– *люмінесцентні лампи*: освітлювачі, які обладнані такими лампами, застосовуються в теплицях невеликої площі; необхідний спектр світла досягається комбінуванням ламп із різним світлом; основним недоліком є те, що такі лампи не призначені для роботи за вологості повітря вище 70%;

– *натрієві лампи під тиском*: мають високі показники світловіддачі; створюють у теплицях монохроматичне жовто-помаранчеве світлове поле;

– *галогенні лампи*: вважаються одним із найбільших оптимальних варіантів, так як їх світло найбільш наближене за спектральним складом до сонячного світла; недоліком таких ламп є незначний термін експлуатації та висока вартість;

– *світлодіодні лампи*: їх використання дає можливість регулювати спектральний склад та інтенсивність світла; не впливають на інші показники мікроклімату; незначне споживання електроенергії; тривала експлуатація.

Під час проектування систем штучного доосвітлення в теплицях варто враховувати те, що для створення оптимальних умов вирощування необхідно дотримуватися наступних правил: штучне доосвітлення не повинно повністю замінювати природне світло, лампи призначені для збільшення тривалості світлового дня у теплицях; системи штучного доосвітлення повинні функціонувати не більше 16 год./добу з обліком типів і періодів вегетації рослин.

Системи зволоження повітря, поливу і мінерального живлення рослин. Процедура підтримання оптимальної вологості тепличних ґрунтів і повітря зони вирощування є потенційно однією з найскладніших у тепличних умовах. Основна проблема, яка пов'язана з регулюванням вологості в теплицях зазвичай пов'язана з високим рівнем зволоження, що виникає переважно в холодний період року та є результатом конденсації на рослинах або поверхнях теплиць.

Технологічні процеси зволоження тепличних культур умовно можна розділити на дві категорії: *зрошення ґрунтів* та *зволоження повітря*.

У залежності від геометричних розмірів зрошуваної площі, типів вирощуваних культур, зовнішніх кліматичних умов та характеристик ґрунтів у теперішній час застосовуються різні технології поливу. Найбільшого розповсюдження набули: *крапельне зрошення* – така технологія вважається найбільш економічно вигідним та раціональним способом зрошення тепличних ґрунтів, спеціальна точкова система поливу забезпечує рослини необхідною кількістю вологи; *дощування* – для деяких типів культур краще підходить полив, який імітує отримання вологи в природному середовищі, під час дощування вода розпилюється над рослинами згори та подається у вигляді дрібних крапель; *внутрішньогрунтовий полив* – такий спосіб поливу рослин у теплицях вважається досить ефективним через те, що за допомогою цього різновиду поливу досягається рівномірний розподіл вологи та прикоренева зона рослин завжди знаходиться в оптимальному зволоженому стані.

На теперішній час оптимальним технічним рішенням для зволоження повітря зони вирощування теплиць вважається ультразвукове промислове зволоження. Цей метод характеризується наступними перевагами: рівномірне зволоження всієї зони вирощування культур незалежно від площі теплиці; можливість створення й адаптивного керування рівнем вологості повітря в залежності від типів культур, що вирощуються; генерація дрібнодисперсного туману з розміром частинок від 1 мкм до 5 мкм; енергозберігаюча технологія. Також варто зазначити, що такий метод зволоження є найбільш ефективним, проте не єдиним на теперішній час, окрім нього використовуються наступні методи: випаровування нагріванням і випаровування з поверхні потоком повітря.

Система обігріву і система підживлення рослин вуглекислим газом конструктивно являють собою єдину систему, будову якої розглянемо окремо в п. 1.4.

1.4. Улаштування системи обігріву та підживлення рослин вуглекислим газом

Розрахункові температури зовнішнього повітря в холодний період року для проектування систем опалення приймаються згідно діючого на Україні нормативного документу [3] для району будівництва.

Для компенсації теплових втрат у теплиці використовуються труби нижнього, верхнього та підлоткового водяного трубного обігріву, а також підігріву субстрату.



Рис. 1.6. Зовнішній вигляд змішувальної групи системи обігріву тепличного блоку (ПАТ Комбінат "Тепличний")

Підтримка необхідної температури повітря в теплиці передбачена за допомогою автоматичного регулювання теплової потужності кожної системи. Для цього спроектовані змішувальні групи системи обігріву (рис. 1.6). Кожен вузол обслуговує одну теплицю, працює в автономному незалежному режимі управління, при цьому в теплицях блоку паралельно можуть забезпечувати однакові задані параметри мікроклімату. Розділення опалення блоку по теплицям покращує керованість систем обігріву у кожній, забезпечує

підтримку заданих параметрів мікроклімату в межах допустимого відхилення ($\pm 1^{\circ}\text{C}$).

Вузол управління складається зі змішувальних клапанів та циркуляційних насосів, а також трубопроводів обв'язки, арматури, приладів регулювання та вимірювання.

Труби системи обігріву є сталевими. Нагрівні труби систем підлотнового та нижнього обігріву приєднуються до розподільних трубопроводів за допомогою резино-тканинних рукавів. На підводках встановлюється запірні арматура (шарові крани). Нагрівні труби верхнього обігріву приєднуються до розподільних трубопроводів за допомогою сталевих труб $\text{Ø}15\text{мм}$ без запірної арматури.

Нагрівні труби систем верхнього, нижнього та підлотнового обігріву виконуються зі сталевих труб $\text{Ø}51\text{x}2,5$.

Для підігріву води для опалення теплиць використовуються трьохходові водогрійні котли Viessmann типу Vitomax 200 WS (рис. 1.7).



Рис. 1.7. Водогрійний котел Viessmann типу Vitomax 200 WS
(ПАТ Комбінат "Тепличний")

Цей тип водогрійних котлів розроблений спеціально для використання в тепличних комбінатах та комплексах.

Конструкція такого типу котлів зображена на рис. 1.8 та 1.9.

На рис. 1.8 окремо виділені три незалежних газоходи для руху робочих газів. Перший газохід – циліндрична камера згорання (позиція 1), розташована в нижній частині котла та охоплюється водяною сорочкою.

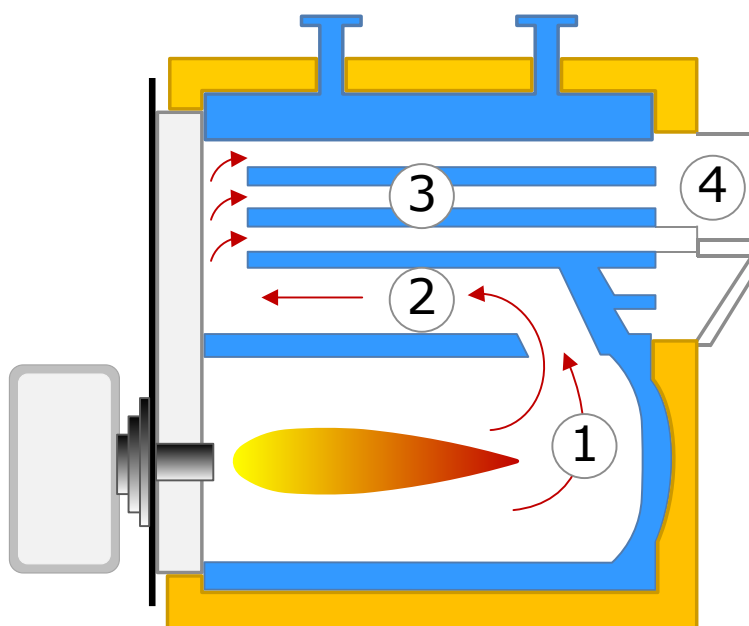


Рис. 1.8. Переріз трьохходового котла Viessmann Vitomax 200 WS

Продукти згорання, що виникають в роботі пальника, переміщуються по жаровій трубі до задньої частини камери згорання і далі до жарових труб (позиція 2) другого газоходу котлового блоку. Після повернення газів, що відводяться, в передню частину котла, знову змінюється напрямок їх потоку. Жаровими трубами третього газоходу (позиція 3) вони рухаються до камери збору продуктів згорання котла (позиція 4).

Для котлів такої конструкції характерний високий середньорічний ККД та низький вміст токсичних речовин у газах, що відводяться. Крім того, перевагою трьохходової конструкції котлів є зменшення часу перебування продуктів згорання в зоні високих температур, що сприяє зниженню емісії оксидів азоту.

Температура газів, що відходять, в кінцевій зоні камери згорання (перший газохід) не перевищує 1300°C. У внутрішньому просторі жарових труб (другий та третій газоходи) спостерігається різке падіння температури продуктів згорання (рис. 1.10), що свідчить про їх різке охолодження, що сприяє скороченню часу перебування продуктів згорання в зоні високих температур і зменшенню, таким чином, утворення NO_x.

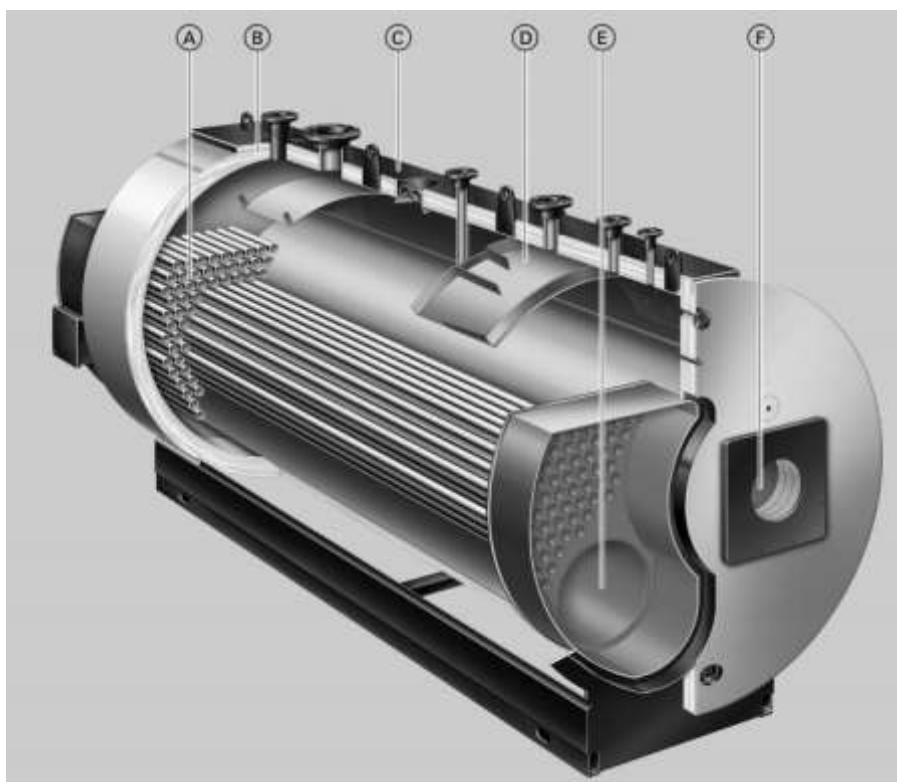


Рис. 1.9. Конструкція котла Viessmann Vitomax 200 WS

A – третій газохід; B – теплоізоляція (100мм); C – верхній прохідний майданчик; D – водонаправляючий щиток; E – другий газохід; F – камера згорання

Охолодження димових газів на виході з котла (170-180°C) до температури 50-60°C відбувається за допомогою спеціальних теплообмінних апаратів - економайзерів.

Разом з котлами Viessmann Vitomax 200 WS використовуються економайзери Viessmann Vitotrans 333c (рис. 1.11).

Димові гази в таких економайзерах охолоджуються за допомогою відпрацьованої води системи опалення теплиці, що прямує до котла на нагрівання.

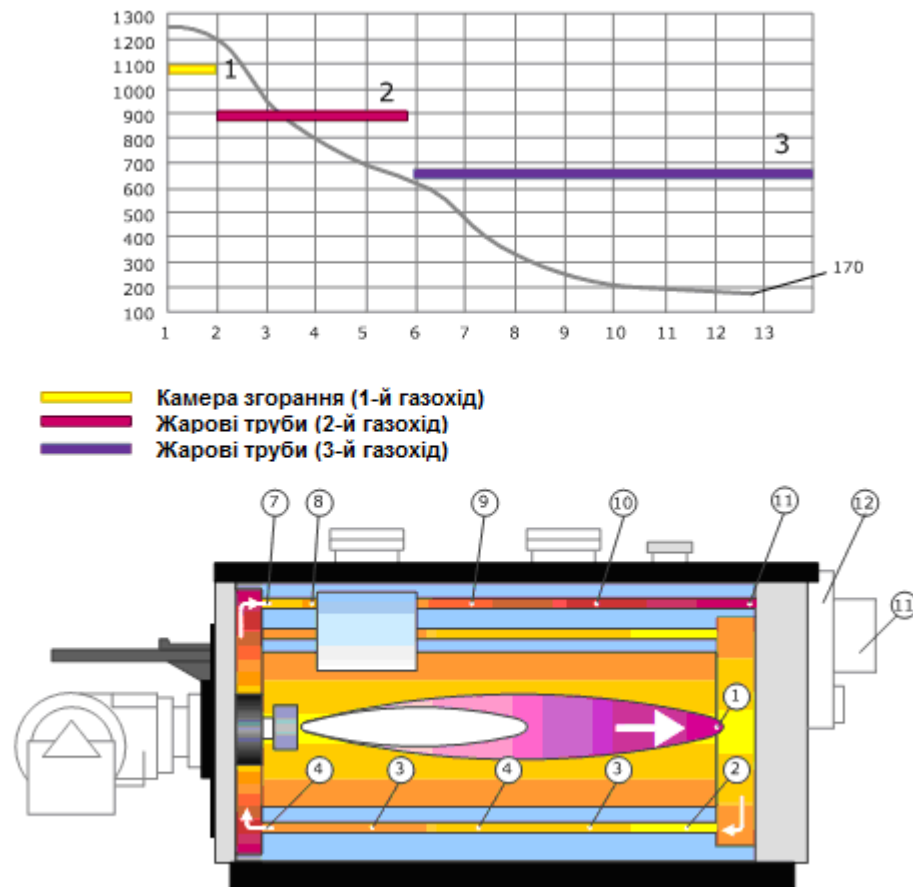


Рис. 1.10. Приблизний розподіл температури в окремих газоходах трьохходового котла серії Vitomax 200 WS



Рис. 1.11. Економайзери Viessmann Vitotrans 333c

A – отвір для очищення; B – поверхня конденсації із нержавіючої сталі; C - теплоізоляція



Рис. 1.12. Зовнішній вигляд системи отримання CO₂ для підживлення рослин:
 1 – задня частина корпусу котла Viessmann Vitomax 200 WS; 2 – економайзер димових газів у захисному корпусі; 3 – регульовальна заслінка у трубопроводі подачі CO₂ у блок теплиць

1.5. Нормативні значення параметрів мікроклімату в промисловій теплиці для вирощування овочів

Нормативні значення параметрів мікроклімату в теплиці при вирощуванні різних овочів наведені в таблиці 1.1.

Мінімальне значення радіаційних параметрів, при яких можливий нормальний розвиток тепличних культур, наведено в таблиці 1.2.

Згідно [3] концентрацію CO₂ у зоні вирощування в залежності від світлового режиму слід приймати згідно рекомендацій (таблиця 1.4).

Технологічні параметри мікроклімату в теплиці

Параметр середовища	Од. вимір.	Вирощування розсади	Вирощування рослин	Плодоношення
Культура – томати				
Температура повітря:	°C			
- нічна		16...18	18...20	16...18
- денна (похмуро)		20...26	20...22	18...20
- денна (сонячно)		20...26	24...26	20...22
Відносна вологість повітря	%			
- нічна		50...70	60...70	75...80
- денна (похмуро)		50...70	50...60	70...75
- денна (сонячно)		50...70	50...60	65...70
Концентрація CO ₂ в повітрі	%	0,1...0,2	0,1...0,2	0,1...0,2
Природна освітленість ярусу листя:	кЛк			
- верхнього		10...40	20...40	20...40
- нижнього		-	10...20	10...20
Рухомість повітря	м/с	0,1...0,5	0,1...0,5	0,1...0,5
Культура – огірок партенокарпічного сорту				
Температура повітря:	°C			
- нічна		20...22	20...22	18...20
- денна (похмуро)		22...24	22...24	22...24
- денна (сонячно)		22...24	24...26	26...28
Відносна вологість повітря	%			
- нічна		65...75	60...70	75...80
- денна (похмуро)		65...75	50...60	70...75
- денна (сонячно)		65...75	50...60	65...75
Концентрація CO ₂ в повітрі	%	0,1...0,2	0,1...0,2	0,1...0,2
Природна освітленість ярусу листя:	кЛк			
- верхнього		10...30	20...40	20...50
- нижнього		-	10...20	10...20
Рухомість повітря	м/с	0,1...0,5	0,1...0,5	0,1...0,5

Таблиця 1.2.

Значення радіаційних параметрів для розвитку огірків і томатів

Культура	Освітленість, кЛк	Інтенсивність ФАР, $\frac{МДж}{м^2 \cdot год.}$	Приток ФАР за сонячний день
Огірок	6	0,12	3,6
Томат	8	0,16	7,8

Допустимі граничні параметри середовища в теплиці
при різній освітленості

Параметр	Од. вим.	Значення параметрів середовища				
Освітленість	кЛк	0...10	10...20	20...30	30...40	40...50
Температура:	°С					
- повітря		18...20	20...22	22...24	24...26	26...28
- ґрунту		20...21	21...22	22...23	23...24	24...25
Відносна волог.						
Повітря	%	85...80	80...75	75...70	70...65	65...60
Рухомість повітря	м/с	0,05...0,1	0,15...0,2	0,25	0,25	0,3

Таблиця 1.4.

Норми концентрації CO₂ у зоні вирощування теплиць

Сумарна інтенсивність освітлення, Вт/м ² ФАР	Розсада	До плодоношення	Плодоношення
Культура – томати			
до 40	від 0,05 до 0,07	від 0,05 до 0,07	від 0,04 до 0,05
від 40 до 80	від 0,05 до 0,07	від 0,08 до 0,10	від 0,04 до 0,05
від 80 до 160	від 0,09 до 0,10	від 0,10 до 0,15	від 0,07 до 0,10
більше 160	від 0,09 до 0,10	від 0,15 до 0,18	від 0,13 до 0,15
Культура – огірок партенокарпічного сорту			
до 40	від 0,05 до 0,07	від 0,05 до 0,07	від 0,05 до 0,07
від 40 до 80	від 0,07 до 0,10	від 0,10 до 0,15	від 0,07 до 0,10
від 80 до 160	від 0,10 до 0,15	від 0,15 до 0,18	від 0,10 до 0,15
більше 160	від 0,15 до 0,18	від 0,18 до 0,20	від 0,15 до 0,18

Також варто враховувати наступні технологічні вимоги:

– під час інтенсивності освітлення нижче 16 Вт/м ФАР застосування підкормки вуглекислим газом є неефективним;

– максимально допустима концентрація вуглекислого газу в повітрі теплиці становить 0,33%;

– швидкість руху повітря в овочевих теплицях у зоні вирощування в період плодоношення слід приймати наступною: для огірків – від 0,25 м/с до 0,3 м/с; для томатів – від 0,3 м/с до 0,5 м/с; максимально допустима швидкість для всіх типів рослин – 1,0 м/с.

1.6. Розробка функціональної схеми автоматизації системи керування підживленням вуглекислим газом в теплиці

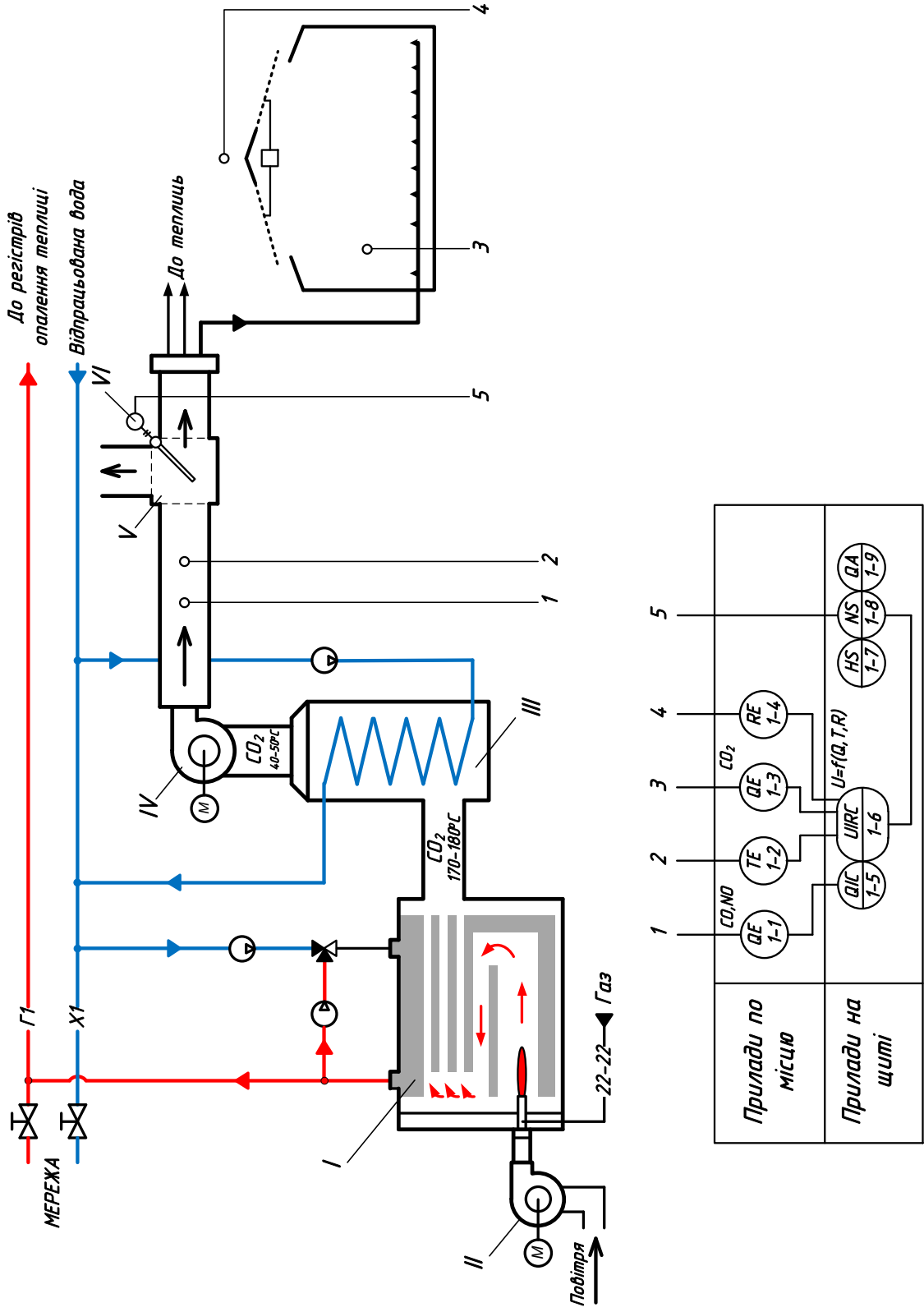
Функціональна схема автоматизації системи керування системою підживлення вуглекислим в теплиці зображена на рис. 1.13.

САК підживленням вуглекислим газом в теплиці працює наступним чином. Регулятор (**UIRC 1-6**), роль якого, як буде показано далі, виконує програмований логічний контролер, отримує сигнали від датчика температури димових газів (**TE 1-2**), датчика концентрації CO₂ в теплиці (**QE 1-3**), а також від датчика сонячної радіації (**RE 1-4**). Контрольно-захисний пристрій (**QIC 1-5**) (захист від перевищення концентрації чадного газу (CO) та оксиду азоту (NO)) отримує сигнал від датчика концентрації CO/NO (**QE 1-1**).

За умови нормальної температури димових газів (до 50°C) та допустимої концентрації чадного газу (CO) та оксиду азоту (NO) у складі димових газів, програмований логічний контролер (**UIRC 1-6**) формує керуючі сигнали – напругу живлення сервоприводу газового клапану, який збільшує або зменшує кількість вуглекислого газу, що потрапляє у теплицю.

Отже, у системі передбачене керування концентрацією вуглекислого газу в теплиці за неперервним алгоритмом керування.

У випадку, коли температура димових газів перевищує значення 50°C (що може призвести до руйнування транспортної системи подачі CO₂ до теплиць), або концентрація шкідливих газів CO/NO перевищує допустимі значення, регулятор (**UIRC 1-6**) подає сигнал на закривання газового клапану сервоприводом (припиняючи подачу димових газів у теплиці, відкриваючи шлях для викиду димових газів у навколишнє середовище), а також вмикає аварійну звукову сигналізацію (пристрій **QA 1-9**).



	1	2	3	4	5
Прилади по місцю	CO, NO QE 1-1	TE 1-2	QE 1-3	CO ₂ RE 1-4	
Прилади на щиті	QIL 1-5	UIRC 1-6	U=f(Q, T, R)		HS 1-7, NS 1-8, QA 1-9

Рис. 1.13. Функціональна схема автоматизації системи керування системою підживлення CO₂ в теплиці

РОЗДІЛ 2

МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСУ СТВОРЕННЯ ПОВІТРЯНО-ГАЗОВОГО СЕРЕДОВИЩА В ТЕПЛИЦІ

2.1. Математичне моделювання процесу переносу і асиміляції двоокису вуглецю в культивацийному приміщенні

Для розробки математичної моделі процесів створення повітряно-газового середовища у теплиці скористаємося результатами досліджень [12].

Повітряне середовище СЗГ характеризується інтенсивним перемішуванням за рахунок припливних, конвективних і адвективних потоків. Якщо використовувати метод наближеного моделювання [6] та врахувати, що усі внутрішні параметри мікроклімату та мінерального живлення рослин (окрім концентрації CO_2) є стабілізованими, то можна записати рівняння матеріального балансу по двоокису вуглецю:

$$\left[\begin{array}{c} \text{Приріст маси} \\ \text{CO}_2 \text{ в} \\ \text{атмосфері} \\ \text{теплиці} \end{array} \right] = \left[\begin{array}{c} \text{Швидкість} \\ \text{надходження} \\ \text{CO}_2 \text{ від} \\ \text{джерела} \end{array} \right] - \left[\begin{array}{c} \text{Швидкість} \\ \text{споживання} \\ \text{CO}_2 \\ \text{рослинами} \end{array} \right] - \left[\begin{array}{c} \text{Швидкість} \\ \text{обміну CO}_2 \text{ з} \\ \text{навколишнім} \\ \text{середовищем} \end{array} \right]$$

Рис. 3.1. Матеріальний баланс СЗГ за вмістом двоокису вуглецю в повітрі

$$\frac{dm}{dt} = \rho \cdot F_{дж} \cdot C_{дж} - M - \rho \cdot F_y \cdot (C - C_B), \quad (3.1)$$

де m - маса CO_2 у об'ємі тепличного приміщення, мг; ρ - питома вага CO_2 , мг/см³; $F_{дж}, F_y$ - об'ємні швидкості газових сумішей від джерела та від обміну із зовнішнім середовищем відповідно, м³/с; M - масовий потік CO_2 на підтримку продуктивного процесу рослин, мг/с; C, C_B - концентрація CO_2 у теплиці та у зовнішньому середовищі відповідно, млн⁻¹.

З урахуванням того, що процес ПВГ відбувається ізохорично, з виразу (3.1) отримаємо

$$\frac{dC}{dt} = \frac{F_{дж} \cdot C_{дж} - \frac{M}{\rho} - F_v \cdot (C - C_B)}{V}, \quad (3.2)$$

де V - об'єм СЗГ.

Як видно з (3.2), отримана модель враховує тільки основні регулярні складові процесу ПВГ – потужність зовнішнього джерела CO_2 , асиміляцію вуглекислоти рослинами та витрату CO_2 у зовнішнє середовище.

Попередньо визначимо характерні значення часу процесу:

- t - час доби;
- T - номер для вегетації рослин.

Будемо враховувати лімітуючі продуктивний процес рослин фактори:

- 1) ФАР, її середню для рослин щільність потоку $\bar{E}(t, T, L_0)$;
- 2) вуглекислоту, що асимілюється рослинами, рівномірно перемішану в об'ємі теплиці, її концентрацію $C(t)$;
- 3) фотосинтезуючу листову поверхню рослин в СЗГ, її площу $S_L(T)$.

Прийmemo наступні припущення відносно цих компонентів в обмінному процесі:

1) потік сонячного світла $E_A(t, T)$ падає на верхню поверхню тепличного приміщення та послаблюється елементами огороджуючих конструкцій у K_N -разів;

2) у товщі рослин відбувається додаткове послаблення потоку сонячного світла за законом Бера-Ламберта [2] та його можна характеризувати середньою за висотою рослини величиною.

Із урахуванням прийнятих припущень запишемо вираз для розрахунку середнього потоку ФАР у рослинному покриві:

$$\bar{E} = \frac{K_N \cdot K_\phi \cdot A_0}{1 + \eta \cdot L_0(T)} \cdot E_A(t, T), \quad (3.3)$$

де K_N - безрозмірний коефіцієнт пропускання світла огорожуючими елементами конструкції теплиці;

K_ϕ - безрозмірний емпіричний коефіцієнт переходу від інтегральної сонячної радіації до ФАР;

A_0 - коефіцієнт поглинання ФАР зеленим листом;

η - емпіричний коефіцієнт.

Якщо припустити, що найбільш важливим фактором, що визначає зростання листової поверхні, є інтенсивність фотосинтезу [12], то можна записати математичну модель продуктивної складової балансового рівняння (3.2) у вигляді

$$M(t, T) = S_T \cdot L_0(T) \cdot P(C, \bar{E}), \quad (3.4)$$

та рівняння блоку зростання у формі

$$L_0(T) = f(T), \quad (3.5)$$

де S_T - площа культивуваційного приміщення.

В роботі [16] досліджували закономірності зміни температури та вологості повітря в теплиці під дією інфільтрованого зовнішнього повітря в процесі вентиляції теплиць. Показано, що визначаючим фактором при оцінці статичних і динамічних характеристик СЗГ виступає кратність повітрообміну:

$$K_p = \frac{L_B}{V}. \quad (3.6)$$

де K_p - кратність повітрообміну, 1/с;

L_B - повітрообмін в теплиці, м³/с.

Звернемо увагу, що якщо в рівнянні (3.1) прийняти $F_v = L_B$, то з рівняння (3.6) можна отримати

$$F_v = K_p \cdot V. \quad (3.7)$$

Це дає підставу записати вираз для третьої (вентиляційної) складової балансового рівняння (3.1) у вигляді

$$G_v = \rho \cdot K_p \cdot V \cdot (C - C_B), \quad (3.8)$$

де G_v - масовий потік CO_2 у зовнішнє середовище за рахунок вентиляції приміщення, мг/с.

Для зручності наступної інтерпретації результатів моделювання позначимо у (3.3)

$$E_B = K_N \cdot K_\phi \cdot E_A, \quad (3.9)$$

де E_B - щільність потоку ФАР, що спадає на верхню поверхню рослин у теплиці.

Виписуючи послідовно рівняння (3.3) з урахуванням (3.9), (3.4), (3.8), отримаємо статичне наближення вихідного рівняння (3.1):

$$\begin{aligned} G_{дж} &= M(t, T) + G_v; \\ M(t, T) &= S_T \cdot L_0(T) \cdot P(C, \bar{E}) \\ \bar{E} &= \frac{E_B \cdot A_0}{1 + \eta \cdot L_0(T)}; \\ E_B &= K_N \cdot K_\phi \cdot E_A; \\ G_v &= \rho \cdot K_p \cdot V \cdot (C - C_B); \\ K_p &= K_{p0} \cdot \exp(K_v \cdot \omega); \end{aligned} \quad (3.10)$$

де $G_{дж}$ - продуктивність джерела вуглекислоти, мг/с;

$K_{p0} = 2,6 \cdot 10^{-4}$ [12] - кратність повітрообміну при закритих вентиляційних фрамугах в ангарній теплиці, 1/с;

ω - діапазон рівнів вентиляції ($\omega = 0$ при закритих вентиляційних фрамугах, $\omega = 100\%$ при максимально можливому рівні відкриття фрамуг).

$K_v = 0,017$ - коефіцієнт, отриманий у роботі [12].

Як видно із запропонованої моделі (3.10), вона містить невелику кількість параметрів. Продуктивність конкретного виду рослин визначається екзогенними змінними: середньої по вертикалі щільністю потоку ФАР - \bar{E} та

концентрацією вуглекислоти - C , а також ендогенної змінної – функцією росту - $L_0(T)$.

На рис. 3.2 та 3.3 наведені графічні інтерпретації результатів розрахунку вуглекислотної залежності швидкості асиміляції CO_2 рослинами.

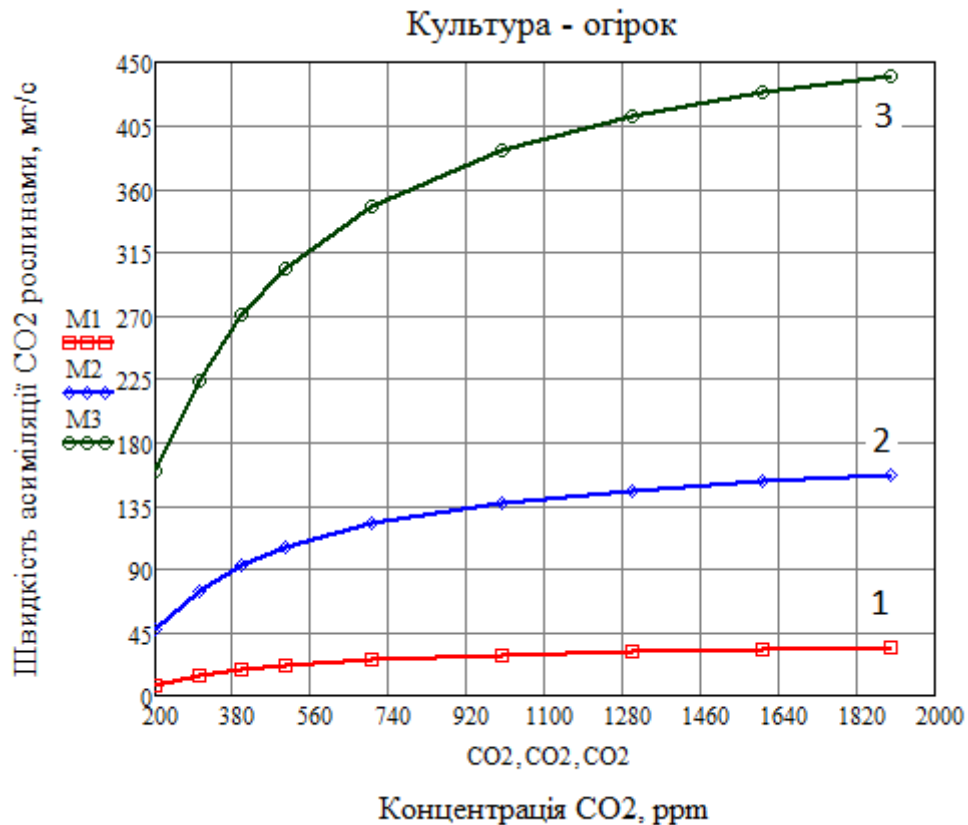


Рис. 3.2. Залежність швидкості асиміляції CO_2 рослинами огірку під дією регульованого фактору:

- 1 – період початку плодоношення: площа листової поверхні $S_L = 500 \text{ м}^2$, $E_A = 150 \text{ Вт} / \text{м}^2$;
- 2 – фаза початку активного плодоношення $S_L = 1500 \text{ м}^2$, $E_A = 250 \text{ Вт} / \text{м}^2$;
- 3 – фаза активного плодоношення $S_L = 2500 \text{ м}^2$, $E_A = 450 \text{ Вт} / \text{м}^2$

Концентрацію CO_2 прийнято вимірювати в %, ppm або в мг/л.

1 ppm – (англ. part per million) одна мільйонна доля. Мається на увазі, що за об'ємом на 1000000 частин повітря припадає 1 частина CO_2 . Наприклад, 300 ppm (0,03%) – це природна концентрація вуглекислоти в навколишньому повітрі.

Концентрація CO_2 в мг/л розраховується наступним чином. При однакових умовах об'єми 1 моль газоподібних речовин однакові. При нормальних умовах ($t = 0 \text{ }^\circ\text{C}$, $T = 273 \text{ К}$, $p = 101325 \text{ Па} = 1 \text{ атм} = 760 \text{ мм рт. ст.}$) цей молярний об'єм дорівнює 22,4л. Маса 22,4л повітря дорівнює 28,9г. (тобто маса 1л повітря дорівнює 1,29г.). Повітря складається з суміші (% об.): азот – 78,09%, кисень – 20,95%, вуглекислий газ – 0,03%, інші гази – 0,94%. Звідки можна вирахувати, що концентрація CO_2 0,03% відповідає концентрації 0,39 мг/л.

Дані, представлені на рис. 3.2 та 3.3, отримані для базисного варіанту за моделлю (3.4). Параметри радіаційного режиму за даними [20] приймалися такими, що дорівнюють $K_N = 0,7$; $K_\phi = 0,5$; $A_0 = 0,85$; $\eta = 0,33$. Залежність швидкості асиміляції CO_2 огірка і томату розраховувалися для характерного діапазону зміни листового індексу L_0 , який складає значення $L_0 = 0,5 \dots 2,5$. Дані розрахунку наведені в таблиці (додаток А1). Співставляючи залежності 1,2 та 3 на рис. 3.2 та 3.3, можна прослідкувати вплив збільшення щільності потоку ФАР та площі поверхні листя зростаючих рослин на граничні значення швидкості асиміляції двоокису вуглецю.

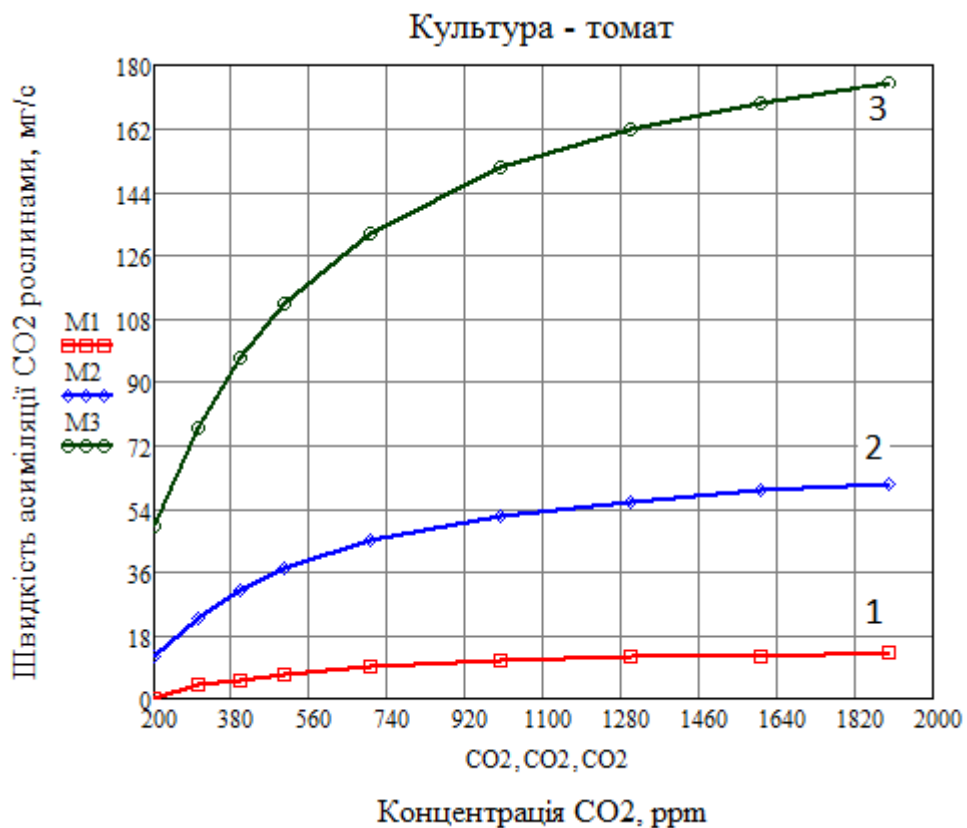


Рис. 3.3. Залежність швидкості асиміляції CO_2 рослинами томату під дією регульованого фактору:

- 1 – період початку плодоношення: площа листової поверхні $S_L = 500 \text{ м}^2$, $E_A = 150 \text{ Вт/м}^2$;
- 2 – фаза початку активного плодоношення $S_L = 1500 \text{ м}^2$, $E_A = 250 \text{ Вт/м}^2$;
- 3 – фаза активного плодоношення $S_L = 2500 \text{ м}^2$, $E_A = 450 \text{ Вт/м}^2$

Як видно, із зростанням концентрації вуглекислого газу в теплиці C та збільшенням площі листової поверхні рослин S_L відбувається монотонне зростання швидкості асиміляції. Для огірка це збільшення відбувається в діапазоні від 34 до 440, для томатів – від 13 до 175 мг/с. Важливо відмітити, що при низьких значеннях потоку природного світла ($E_A < 50 \text{ Вт/м}^2$) рослини не мають необхідності у підвищеній концентрації CO_2 , оскільки у цих умовах у рослині переважає процес дихання і вони самі виділяють CO_2 .

Якщо враховувати, що процес формування врожаю носить інтегральний характер та скористатись спрощеною теоретичною моделлю зростання агроценозу [20], то, враховуючи прийняті позначення та припущення, можна записати співвідношення для розрахунку довгоперіодичних балансових складових процесу ПВГ у вигляді:

$$M = \int_0^T L(T) \int_{t_B}^{t_3} P(C, \bar{E}) dt dT; \quad (3.11)$$

$$N = \frac{1}{S_T} \cdot \int_0^T \int_{t_B}^{t_3} G_y(K_p, C) dt dT; \quad (3.12)$$

$$Q = E_{PP} \cdot M, \quad (3.13)$$

де M - кількість двоокису вуглецю, асимільованого одиницею рослинного середовища за розрахунковий період; N - кількість CO_2 , витраченого з вентиляційним повітрям; E_{PP} - коефіцієнт ефективності фотосинтезу по продукції.

На завершення відмітимо, що за даними літератури [20] інтегральні рівняння (3.11) – (3.13) відображають загальноприйняті припущення про те, що розвиток рослин відбувається за програмою. Ця програма задана спадковими факторами. Основними фотосинтезуючими органами рослин є листя, а продуктивність рослин пропорційна площі листової поверхні.

2.2. Визначення передатної функції СЗГ по каналу регулювання концентрації CO₂

Для визначення динамічних характеристик СЗГ запишемо рівняння матеріального балансу теплиці (3.1) у лінеаризованій формі

$$V \cdot \rho \cdot \frac{dx}{dt} + \left(\frac{\partial M}{\partial C} + \rho \cdot K \cdot P \cdot V \right) \cdot x = \Delta G_{дж} - V \cdot \rho \cdot (C_3 - C_A) \cdot \frac{\partial K_P}{\partial \omega} \Delta \omega - \frac{\partial M}{\partial E} \Delta E, \quad (3.14)$$

де $x(t) = C(t) - C_3(t)$ - відхилення від змінної незбуреного руху об'єкта;

$\Delta \omega, \Delta E$ - контрольоване збурення відповідно рівня вентиляції і освітленості.

Рівняння (3.14) перетворимо до вигляду

$$T_O \cdot \frac{dx}{dt} + x = k_O \cdot \Delta G_{дж} - K_W \cdot \Delta \omega - K_E \cdot \Delta E_A, \quad (3.15)$$

де

$$k_O = \frac{1}{\frac{\partial M}{\partial C} + \rho \cdot K_P(\omega) \cdot V}; \quad (3.16)$$

$$T_O = k_O \cdot V \cdot \rho; \quad (3.17)$$

$$K_E = k_O \cdot \frac{\partial M}{\partial E}; \quad (3.18)$$

$$K_W = k_O \cdot \rho \cdot V \cdot (C_3 - C_A) \cdot \frac{\partial K_P}{\partial \omega}. \quad (3.19)$$

Важливо відмітити, що постійна часу T_O та коефіцієнт передачі об'єкта k_O визначаються витратами CO₂ як на асиміляцію рослинами, так і втратами через огорожуючі конструкції. Ці залежності носять складний характер як від внутрішніх факторів (значення площі листової поверхні S_L , видові відмінності рослин), та і від зовнішніх – освітленості E_A на поверхні листа та рівня

вентиляції ω_o . Однак, якщо в якості траєкторії незбудженого руху використовувати залежність (3.20) [12] і моделювати рівні вентиляції емпіричною залежністю (3.21) [12], то можна оцінити діапазон варіації T_o та k_o в процесі росту рослин.

$$C_3 = 300 + C_0 + C_1 \cdot \omega_o + (C_2 + C_3 \cdot \omega_o) \cdot E_A. \quad (3.20)$$

$$\omega_o = 0,05 \cdot (L(T) - 1) \cdot E_A. \quad (3.21)$$

Таблиця 3.1. Чисельні параметри виразу (3.20) в залежності від культури [12]

Культура	Параметри моделі (3.20)			
	C_0	C_1	C_2	C_3
Огірок	-71	-1,73	4,97	-0,034
Томат	-87	-1,57	4,89	-0,034

Приклад такої оцінки для широкого діапазону освітленості на поверхні рослин E_B показаний в таблиці 3.2.

Якщо порівнювати значення похідних $\frac{\partial M}{\partial C}$ та $\frac{\partial G_y}{\partial C}$, можна відмітити незначний вклад (<5%) асиміляційної складової. Видно також, що в досліджуваному діапазоні факторів навколишнього середовища E_A та ω_o значення T_o та k_o визначається в основному рівнем вентиляції СЗГ. Наприклад, значення постійної часу може змінюватись в діапазоні від однієї години до десяти хвилин.

Таблиця 3.2. Результати оцінки варіації T_o та k_o в процесі росту рослин

Освітленість $E_A, \text{Вт} / \text{м}^2$	Листовий індекс, $L_o, \text{м}^2 / \text{м}^2$	Рівень вентиляції $\omega_o, \%$	Коефіцієнти балансової складової, $\text{мг } \text{CO}_2 / \text{ррм} \cdot \text{с}$		Постійна часу $T_o, \text{с}$	Коефіцієнт передачі k_o
			асиміляції	втрат		
			$\frac{\partial M}{\partial C}$	$\frac{\partial G_y}{\partial C}$		
50	0,5	0	0,017	1,80	3813	0,55
150		0	0,046	1,80	3788	0,55
350		0	0,046	1,80	3776	0,54
550		0	0,045	1,80	3775	0,54
650		0	0,043	1,80	3775	0,54
50	1,5	4	0,040	1,91	3553	0,51
150		11	0,116	2,15	3115	0,45
350		25	0,125	2,43	2447	0,35
550		39	0,131	2,73	1931	0,28
650		46	0,139	3,08	1715	0,25
50	2,5	11	0,054	2,15	3139	0,45
150		32	0,168	3,08	2165	0,31
350		74	0,259	4,40	1055	0,15
550		100	0,355	9,86	666	0,10
650		100	0,534	9,86	666	0,10

Розглядаючи сигнали $\Delta\omega$ та ΔE_A як збурення і враховуючи транспортне запізнення у трубопроводі подачі газової суміші, передаточна функція СЗГ по каналу регулювання концентрації CO_2 матиме наступний вигляд:

$$W_o(s) = \frac{k_o}{T_o \cdot s + 1} \cdot e^{-\tau_o \cdot s}. \quad (3.22)$$

Як було показано у попередньому розділі, для підживлення рослин вуглекислим газом передбачається використовувати відпрацьовані гази водогрійної котельної установки. Тому на транспортне запізнення може впливати певна віддаленість котельної від теплиці. Цю обставину визначає довжина трубопроводу подачі газу і транспортне запізнення на вході в об'єкт управління можна розрахувати за виразом

$$\tau_o = l_{TP} \cdot \frac{\pi \cdot D_{TP}^2}{4 \cdot F_{ДЖ}}, \quad (3.23)$$

де $F_{ДЖ}$ - об'ємна швидкість газової суміші від джерела CO_2 , $\text{м}^3/\text{с}$;

l_{TP} - довжина трубопроводу подачі CO₂ від котельної установки до входу в теплицю, м (приймається $l_{TP} = 100...150$ м);

D_{TP} - діаметр трубопроводу подачі CO₂ у теплицю, м (приймається $D_{TP} = 0,25...0,32$ м).

Об'ємна швидкість газової суміші $F_{ДЖ}$ визначається потужністю дутьового вентилятора котла. У низькотемпературних котлах Viessmann Vitomax 200 WS в якості дутьового вентилятора використовується відцентровий вентилятор з максимальною продуктивністю 700 м³/год. (або 0,2 м³/с).

Для подальших розрахунків визначимо за таблицею 3.1 передаточну функцію теплиці за умов: освітленість $E_A = 350$ Вт/м²; листовий індекс $L_0 = 1,5$ м²/м²; рівень вентиляції $\omega_0 = 25\%$; довжина трубопроводу подачі CO₂ $l_{TP} = 150$ м; діаметр трубопроводу подачі CO₂ у теплицю $D_{TP} = 0,30$ м; об'ємна швидкість газової суміші відповідає роботі котла на 50% $F_{ДЖ} = 0,1$ м³/с.

Тоді:

$$T_O = 2447 \text{ с}; k_O = 0,35;$$

$$\tau_O = l_{TP} \cdot \frac{\pi \cdot D_{TP}^2}{4 \cdot F_{ДЖ}} = \frac{150 \cdot 3,14 \cdot 0,3^2}{4 \cdot 0,1} = 118 \text{ с}.$$

Отримаємо, що передаточна функція СЗГ по каналу регулювання концентрації CO₂ при вказаних умовах визначається виразом

$$W_O(s) = \frac{k_O}{T_O \cdot s + 1} \cdot e^{-\tau_O \cdot s} = \frac{0,35}{2447 \cdot s + 1} \cdot e^{-118 \cdot s}.$$

РОЗДІЛ 3

ВИБІР РЕГУЛЯТОРА ТА ОБГРУНТУВАННЯ ПАРАМЕТРІВ ЙОГО НАЛАШТУВАНЬ

3.1. Обґрунтування вибору алгоритму керування

Використовуючи дані про об'єкт автоматизації – статичні і динамічні характеристики, відомості про збурення, технологічні вимоги до якості регулювання, можна у кожному конкретному випадку на основі вироблених практикою критеріїв визначити алгоритм керування і вибрати тип регулятора. Вибір цей є попереднім, а кінцевий висновок про стійкість системи "об'єкт – регулятор" і точність керування роблять на основі подальших розрахунків.

При виборі типу регулятора рекомендується [14] орієнтуватися на величину відношення запізнення до постійної часу об'єкта $\frac{\tau_{ov}}{T_{ov}}$.

- Якщо $\frac{\tau_{ov}}{T_{ov}} < 0,2$, перевагу віддають позиційному (релейному)

алгоритму керування, але можливе використання і неперервного алгоритму. Рішення приймається в залежності від технологічних вимог до процесу керування.

- Якщо $0,2 < \frac{\tau_{ov}}{T_{ov}} < 1,0$, перевагу віддають неперервному або

цифровому алгоритму керування (П-, ПП- або ППД-алгоритм).

- Якщо $\frac{\tau_{ov}}{T_{ov}} > 1,0$, вибирають спеціальний цифровий регулятор з

екстраполятором, який компенсує запізнювання в контурі керування.

Отже, в нашому випадку $\frac{\tau_{ov}}{T_{ov}} = \frac{118}{2447} = 0,048$.

Теплиця для каналу керування концентрацією вуглекислого газу характеризується:

- досить значною інерційністю;
- нерівномірністю споживання (асиміляції) CO₂ рослинами внаслідок можливих швидких змін погодних умов (зміна сонячної освітленості із захмареністю) або при використанні системи зашторювання для зняття перегріву рослин при значній сонячній радіації;
- частими збуреннями внаслідок роботи системи вентиляції (відкриття або закриття вентиляційних фрамуг).

Особливістю роботи системи підживлення вуглекислим газом в теплиці є те, що водогрійний котел у денний час працює постійно, і вуглекислий газ із димових газів отримується також неперервно.

Враховуючи зазначені умови і конструктивні особливості системи підживлення вуглекислим газом, використання позиційного алгоритму керування може призвести до значних значень концентрації CO₂ в теплиці. Тому лише за співвідношенням $\frac{\tau_{ov}}{T_{ov}}$ обирати позиційний алгоритм регулювання недоцільно. Алгоритм регулювання повинен бути обраний неперервний.

3.2. Реалізація алгоритму керування

Згідно із функціональною схемою автоматизації система керування підживленням вуглекислим газом в промисловій теплиці складається з:

- програмованого логічного контролера (ПЛК), який отримує інформацію від різноманітних датчиків;

- датчиків: концентрації вуглекислого газу в теплиці; температури димових газів; перевищення допустимої концентрації чадного газу (CO) та оксиду азоту (NO); рівня сонячної радіації;

- контрольно-захисного пристрою перевищення концентрації чадного газу (CO) та оксиду азоту (NO);

- електрообладнання для керування відповідними виконавчими механізмами.

Детальний вибір електрообладнання для пуску та захисту виконавчих механізмів, комутації кіл керування, ручного керування та світлової сигналізації розглядається у розділі 5 бакалаврської кваліфікаційної роботи, а вибір програмованого логічного контролера, датчиків та виконавчих механізмів викладений у подальшому матеріалі.

3.2.1. Вибір програмованого логічного контролера

Для отримання інформації про параметри мікроклімату та керування технологічним обладнанням обраний програмований логічний контролер ПЛК73 ОВЕН (рис. 3.1).



Рис. 3.1. Програмований логічний контролер ПЛК73 ОВЕН

Контролер призначений для створення систем автоматизованого керування технологічним обладнанням в енергетиці, на транспорті, у т.ч. залізничному, у різних галузях промисловості, житлово-комунального та сільського господарства.

Логіка роботи ПЛК визначається замовником у процесі програмування контролера. Програмування здійснюється за допомогою програмного забезпечення CoDeSys 2.3.

Контролер може бути використаний як:

- спеціалізований пристрій керування виділеним локалізованим об'єктом;
- пристрій моніторингу локалізованого об'єкту у складі комплексної інформаційної мережі;
- спеціалізований пристрій керування і моніторингу групою локалізованих об'єктів у складі комплексної інформаційної мережі.

У контролері реалізовані наступні функції:

- виконання програми роботи контролера, розробленої користувачем у середовищі CoDeSys 2.3;
- зняття вимірюваних значень із вбудованих аналогових і дискретних входів із наступною передачею їх у програму користувача;
- керування вбудованим вихідним пристроєм контролера із програми користувача;
- розширення кількості вхідних та вихідних пристроїв із використанням модулів розширення, що підключаються до контролера за допомогою спеціального інтерфейсу;
- обмін даними по інтерфейсам RS-485 та RS-232;
- відображення символічних даних, що формуються у програмі користувача, на рідкокристалічному індикаторі;
- відображення інших даних, що формуються у програмі користувача, на 6 вбудованих світлодіодах;

- відлік реального часу вбудованим годинником із автономним джерелом живлення;
- налагодження параметрів функціонування вбудованих входів, виходів та іншого периферійного обладнання контролера і збереження значень конфігураційних параметрів у енергонезалежній пам'яті (зміна значень конфігураційних параметрів контролера на рідкокристалічному індикаторі за допомогою вбудованої клавіатури; зміна значень параметрів із середовища програмування CoDeSys).

Технічні характеристики програмованого логічного контролера ПЛК73 ОВЕН наведені у додатку Б1, Б2.

3.2.2. Вибір датчика концентрації вуглекислого газу в теплиці

До датчиків систем керування ставляться такі вимоги: лінійність і однозначність статичної характеристики (нелінійність не повинна перевищувати 0.1...0.3%). Висока чутливість (крутизна) і стабільність характеристик в часі, швидкодія, стійкість проти хімічних впливів навколишнього середовища і середовища, що контролюється, зручність монтажу та обслуговування та ін. Як правило датчик вибирають у два етапи. На першому – за родом параметру, що контролюється, і умовами роботи визначають різновид датчика, на другому, коли вже вибрані усі елементи САК, за каталогом знаходять його типорозмір. При цьому датчик рекомендується підбирати таким чином, щоб величина, що вимірюється, знаходилася в межах $1/3...2/3$ діапазону його вимірювання. Особливу увагу необхідно звертати на швидкодію (інерційність) датчика. Також враховується його коефіцієнт чутливості.

Датчик на основі твердого електроліту для визначення концентрації CO_2 в повітрі TGS4160 японської фірми Figaro має гібридну структуру, що утворюється чутливим елементом і термістором (рис. 3.2). Сенсор складається

з твердого електроліту, розміщеного між двома електродами. Носіями заряду є катіони натрію Na^+ . Нагрівний елемент виконаний в вигляді платинової підкладки. Катод (електрод порівняння) виготовляється з карбонату літію та золота, анод (вимірювальний електрод) – із золота. Термістор служить для компенсації температурної залежності сенсора. В середовищі з вуглекислим газом на електродах датчика протікають електрохімічні реакції, в результаті яких на елементі створюється різниця потенціалів (ЕДС), що і є відкликом датчика.

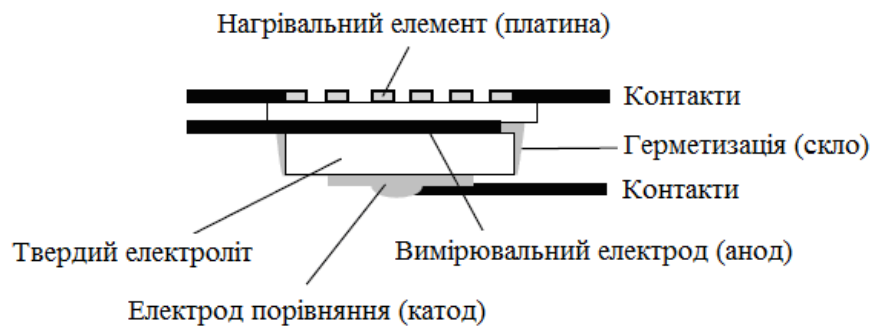


Рис. 3.2. Конструкція чутливого елемента датчика на основі твердого електроліту

Для підтримання оптимальної температури сенсора на нагрівний елемент подається напруга.

На рис. 3.3 приведена залежність чутливості датчика від концентрації вуглекислого газу.

Параметр, що реєструється – різниця між значеннями ЕДС, що відповідають концентрації вуглекислого газу 350 ppm (0,45 мг/л) ЕДС_{350} та фактичному значенню концентрації CO_2 ЕДС_Φ :

$$\Delta \text{ЕДС} = \text{ЕДС}_{350} - \text{ЕДС}_\Phi. \quad (3.1)$$

Як бачимо, датчик TGS4160 має лінійну статичну характеристику (в логарифмічному масштабі).

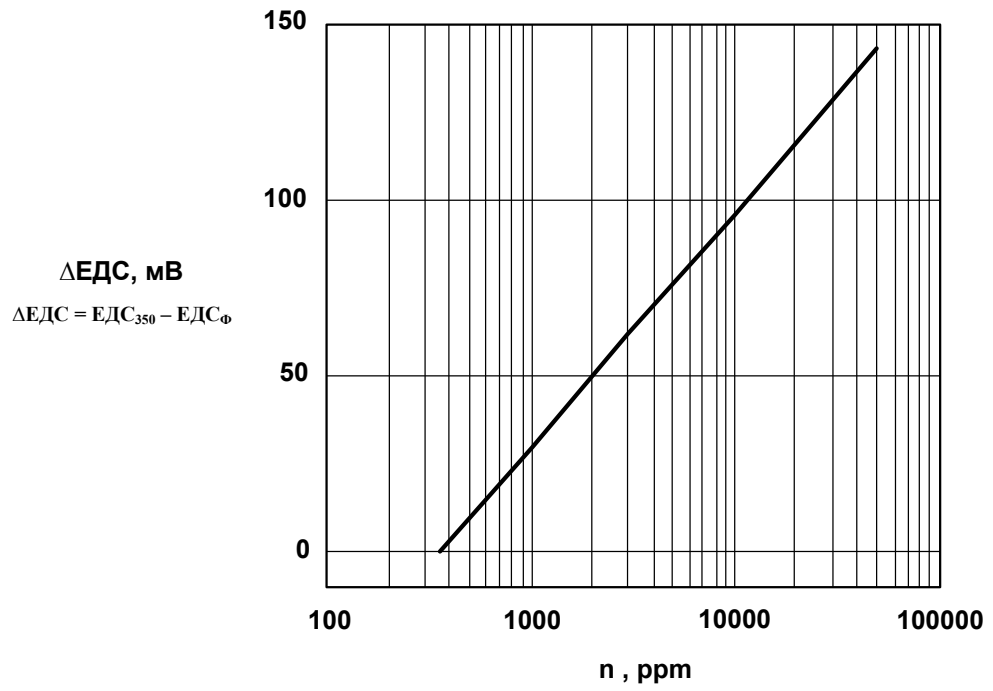


Рис. 3.3. Статична характеристика датчика TGS4160



Рис. 3.4. Габаритні розміри та зовнішній вигляд датчика TGS4160

Технічні характеристики датчика TGS4160

Діапазон робочих температур, °C	-10...+50 (відн. вол. 95%)
Діапазон вимірювання, ppm (мг/л)	350 (0,45)...5000 (6,45)
Напруга, що подається на нагрівний елемент, В	5 (DC)
Струм на нагрівному елементі, мкА при 5 VDC	250
Опір нагрівного елемента, Ом	11,5±1,1
Інерційність, с	30
Вимірюване середовище	Газ

Для забезпечення максимальної точності вимірювання датчиком TGS4160, виробником створений вимірювальний модуль на основі мікропроцесора FIC98648 для цифрової обробки сигналу, який має уніфікований вихід – постійну напругу 0..3 В (схема електрична принципова вимірювального модуля наведена в додатку В1), для роботи в діапазоні 400 ppm (0,52 мг/л) – 3000 ppm (3,87 мг/л).

При цьому напруга 0 В відповідає концентрації 400 ppm (0,52 мг/л), напруга 3 В – концентрації 3000 ppm (3,87 мг/л), тобто лінійну залежність (рис. 3.5).

Передатна функція вимірювального модуля як сприймаючого елемента є інерційною ланкою

$$W_{CE}(s) = \frac{k_{CE}}{T_{CE} \cdot s + 1}, \quad (3.2)$$

де T_{CE} – постійна часу (інерційність) датчика TGS4160;

$T_{CE} = 30$ с (таблиця 3.1);

k_{CE} – коефіцієнт передачі вимірювального модуля, який визначається за його статичною характеристикою.

$$k_{CE} = \frac{\Delta U}{\Delta n} = \frac{3 - 0}{3,87 - 0,52} = 0,896 \frac{В}{мг/л}, \quad (3.3)$$

Отже, передатна функція сприймаючого елемента:

$$W_{CE}(s) = \frac{0,896}{30 \cdot s + 1}.$$

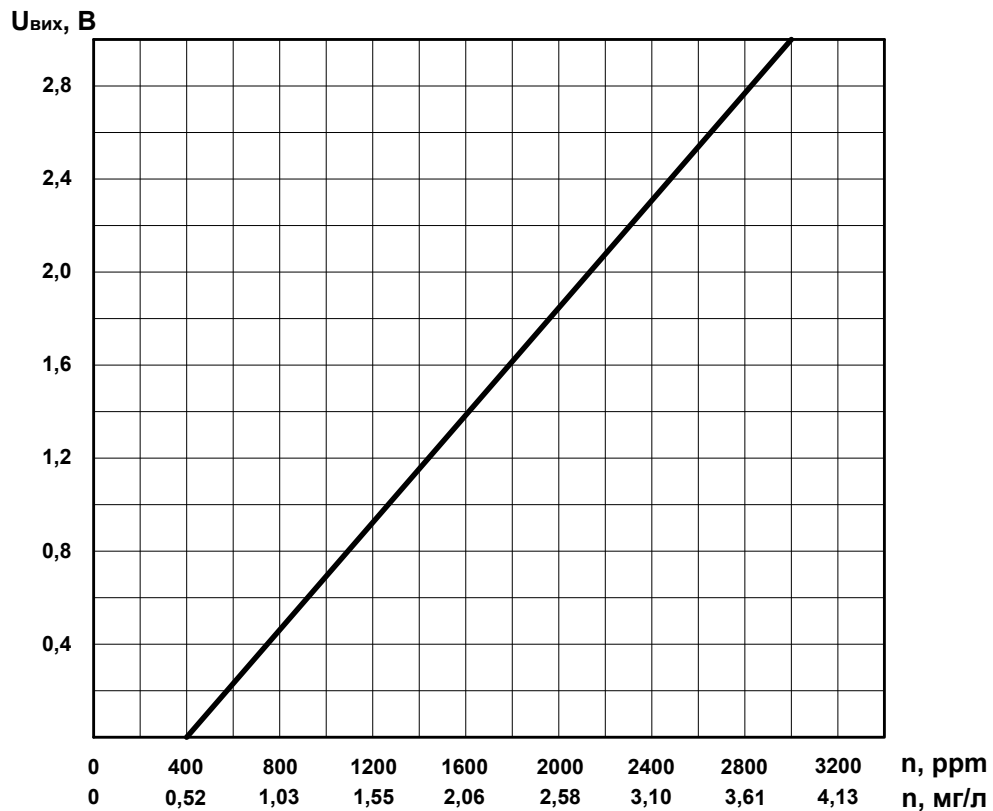


Рис. 3.5. Статична характеристика вимірювального модуля на основі датчика TGS4160 та мікропроцесора FIC98648

3.2.3 Вибір виконавчого механізму САК підживленням вуглекислим газом в теплиці

Виконавчим механізмом (ВМ) називається пристрій автоматики, який діє безпосередньо або через погоджуючі елементи на регулюючий орган об'єкта керування. ВМ, як частина САК, призначений для відпрацювання сигналу керування, який формується управляючими елементами автоматики таким чином, щоб відхилення регульованої величини від заданого значення становило якнайменше значення. Виконавчі механізми, які з'єднані безпосередньо з регулюючими органами, переміщують їх відповідно до сигналу, що надходить від пристрою, який формує закон керування.

До ВМ пред'являють ряд вимог: здатність розвивати необхідне переставне зусилля або момент, достатній для перестановки регулюючого органу об'єкта; забезпечити перестановку регулюючого органу на потрібну величину; забезпечити потрібну швидкість і прискорення переміщення регулюючого органу; мати високі техніко-економічні показники (надійність, ціна та ін.).

Обираємо ВМ залежно від величини обертального моменту необхідного для переміщення регулюючого органу [14]:

$$M_z = k \cdot (M_p + M_m), \quad (3.4)$$

де M_p - реактивний момент:

$$M_p = 0.07 \cdot \Delta P_{\max} \cdot D_y^3 = 0.07 \cdot 9.5 \cdot 10^4 \cdot (50 \cdot 10^{-3})^3 \approx 0.83 \text{ Н} \cdot \text{м};$$

$$M_m = 0.785 \cdot \Delta P_{\max} \cdot D_y^2 \cdot r_m \cdot \lambda = 0.785 \cdot 9.5 \cdot 10^4 \cdot (50 \cdot 10^{-3})^2 \cdot 1 \cdot 10^{-2} \cdot 0.15 \approx 0.28 \text{ Н} \cdot \text{м};$$

$$M_z = 2 \cdot (0.83 + 0.28) = 2.22 \text{ Н} \cdot \text{м}.$$

Момент обертання валу обраного виконавчого механізму повинен бути більшим за момент, необхідний для обертання заслінки: $M_H > M_z$.

В якості електроприводу, яким комплектується газовий регулюючий клапан, виступає сервопривод LM230A-SR Belimo (рис. 3.6), побудований на електродвигуні невеликої потужності і системі передачі.

Сервопривод LM230A-SR Belimo призначений для керування газовими клапанами та повітряними заслінками у системах вентиляції і кондиціонування. Привод оснащений універсальним кріпінням хомутом, за допомогою якого привод швидко встановлюється на вал заслінки. Налаштування кута повороту здійснюється за допомогою механічних обмежувачів.

Технічні характеристики сервоприводу LM230A-SR Belimo газового клапану наведені в таблиці 3.2.



Рис. 3.6. Зовнішній вигляд сервоприводу LM230A-SR Belimo

Таблиця 3.2.

Технічні характеристики сервоприводу LM230A-SR Belimo

Показник	Значення
Напруга живлення	220 В, 50 Гц
Діапазон зміни напруги живлення	85...265 В
Розрахункова потужність	4 ВА
Споживана потужність	1 Вт
Механічне керування	Кнопка із самоповерненням
Обертаючий момент	5 Н·м (при номінальній напрузі живлення)
Кут повороту	Макс. 90°, налагоджується за допомогою механічних обмежувачів
Час повороту	60 с (встановлюється на заводі за запитом 35...150 с)
Ступінь захисту	IP54 при встановленні у будь-якому положенні
Температура експлуатації	-30...+50°C
Температура зберігання	-40...+80°C
Вага	0,7 кг

Передатна функція сервоприводу є інтегруючою ланкою:

$$W_{\text{СЕРВ}}(s) = \frac{k_{\text{СЕРВ}}}{s}. \quad (3.5)$$

$$k_{\text{СЕРВ}} = \frac{90}{60} = 1,5 \frac{\text{град.}}{\text{сек}},$$

де 90 – кут повороту валу сервоприводу, град.;

60 – час повороту валу сервоприводу на кут 90°, с.

$$W_{\text{СЕРВ}}(s) = \frac{1,5}{s}.$$

Оскільки конструктивно у сервоприводі реалізований зворотний зв'язок за положенням (потенціометричний датчик положення), то остаточна передатна функція виконавчого механізму визначається як

$$W_{\text{ВМ}}(s) = \frac{W_{\text{СЕРВ}}(s)}{1 + W_{\text{СЕРВ}}(s)} = \frac{\frac{1,5}{s}}{1 + \frac{1,5}{s}} = \frac{1,5}{s + 1,5} = \frac{1}{\frac{1}{1,5} \cdot s + 1} = \frac{1}{0,67 \cdot s + 1}.$$

3.2.4. Вибір датчика рівня сонячної радіації

Для вимірювання рівня сонячної радіації назовні теплиці вибраний датчик освітленості RIXEN LXT-401A (рис. 3.6).



Рис. 3.6. Датчик освітленості RIXEN LXT-401A

RIXEN LXT-401A – промисловий датчик освітленості для вимірювання освітленості у приміщеннях та зовні. Корпус приладу має ергономічний дизайн та захист від вологи та пилу IP65. Кремнієвий фотосенсор забезпечує хорошу відповідність світловому спектру та довготривалу стабільність вимірювань.

Люксметр має 3 діапазони вимірювань освітленості (0–2000 LUX, 0–20000 LUX та 0–200000 LUX) та забезпечує швидкий результат вимірювання з

високою точністю ± 3 %. Калібрування RIXEN LXT-401A проводиться за двома точками (нуль і значення діапазону).

Області застосування промислового датчика освітленості (люксметр) RIXEN LXT-401A: проведення метеорологічних досліджень. сільське, лісове та рибне господарства; контроль освітленості у школах, бібліотеках, офісах, супермаркетах, універмагах, лікарнях тощо; проведення оптичних експериментів у лабораторії; економне використання джерел світла, таких як лампочки та люмінесцентні лампи; контроль освітленості при вирощуванні рослин у теплицях, парниках та оранжереях; управління освітленням у приміщенні та на вулиці; налаштування та керування освітленням під час зйомки; управління освітленням у музеях для запобігання псуванню експонатів.

Таблиця 3.3.

Технічні характеристики датчика освітленості RIXEN LXT-401A

Показник	Значення показника
Діапазон вимірювань	0...200 000 LUX / 0...20 000 FC доступні три діапазони: 0...2000; 0...20000; 0...200 000 LUX
Вихідний сигнал	4...20 мА
Точність (при температурі 25°C)	± 3 % (випробування за допомогою стандартної лампи розжарювання 2856°K)
Чутливий елемент	кремнієвий фотосенсор із фільтром
Час відгуку	близько 300 мс
Калібрування пристрою	нуль і значення діапазону, що регулюються в кожному діапазоні окремим потенціометром
Джерело живлення	постійна напруга 9...32 В, струм >150 мА
Умови експлуатації	температура: -40 ... +65 °C
Корпус	водонепроникний корпус із ABS пластику
Підключення кабелів	водонепроникний нейлоновий сальник
Габарити	трансмітер: Ø 90x54 мм детектор: Ø 36,5 – Ø 72 x 56 мм, приймач світла: Ø 16 мм
Кабель дистанційного датчика	довжина – 2 м, довжина кабелю може бути налаштована
Схвалено стандартами	IP65, CE, RoHS

3.2.5. Вибір контрольно-захисного пристрою CO/NO

Для забезпечення захисту димових газів від небезпечних концентрацій чадного газу та оксиду азоту обраний пристрій захисту Sercom.

Контрольно-захисний пристрій CO/NO Sercom (рис. 3.7) призначений для запобігання потрапляння у простір теплиці отруйних газів – чадного газу (CO) та оксиду азоту (NO), які можуть утворюватись при неправильному налагодженні або порушенні регулювання пальника водогрійного котла.

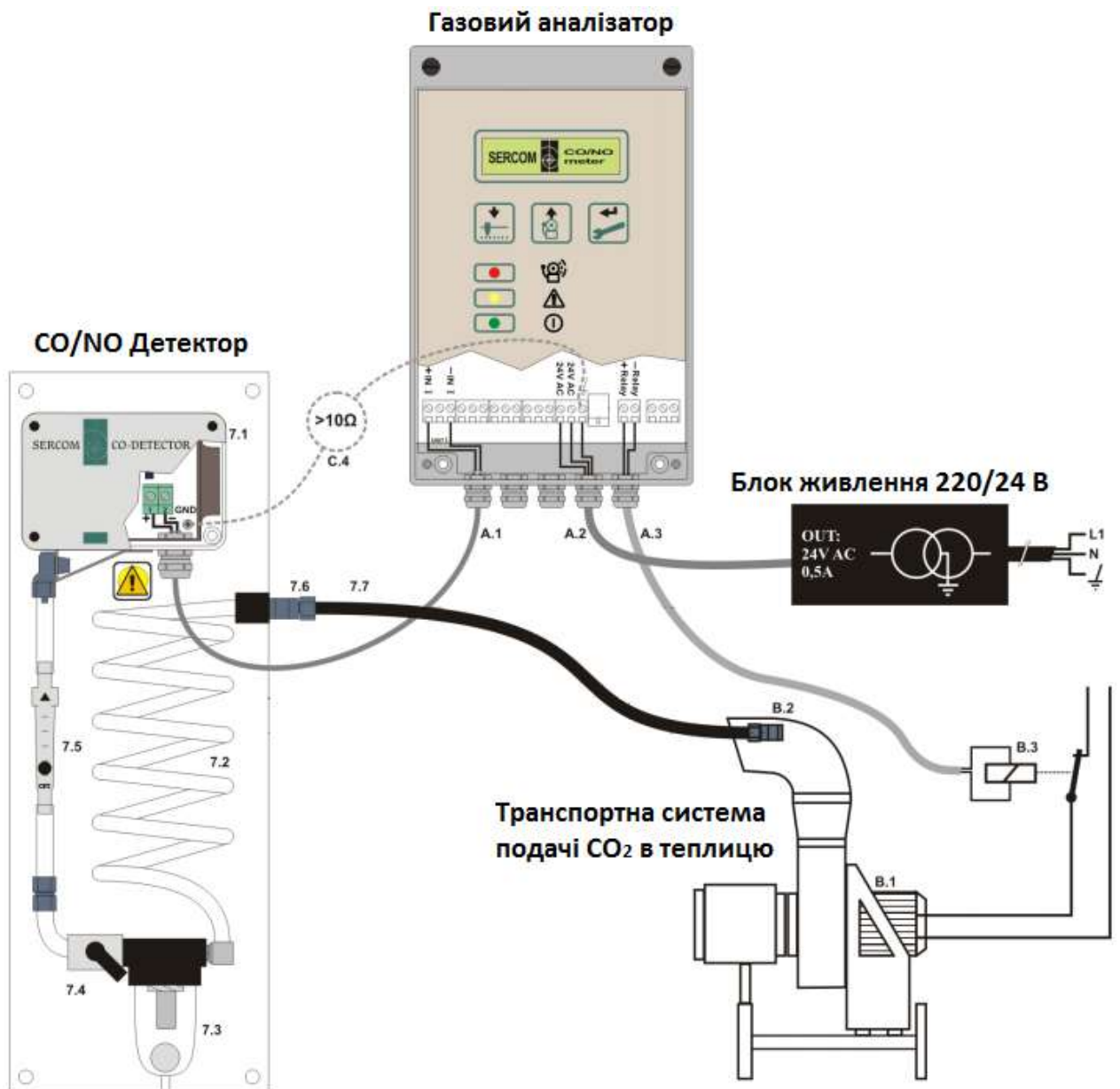


Рис. 3.7. Конструктивна схема контрольно-захисного пристрою CO/NO Sercom

Технічні характеристики контрольно-захисного пристрою CO/NO Sercom наведені в таблиці 3.4.

Таблиця 3.4.

Технічні характеристики пристрою CO/NO Sercom

Напруга живлення	24 В \pm 10%, 50 Гц
Споживана потужність	4,6 Вт
Габаритні розміри	Газовий аналізатор 210x135x33 мм, вага 0,8 кг Газовий детектор 520x200x105 мм, вага 1,5 кг
Діапазон вимірювання CO/NO	0-300 / 0-3000 ppm
Точність вимірювання	\pm 5% (при 20°C)
Робоча температура	0...40°C
Термін експлуатації	5 років

РОЗДІЛ 4

РОЗРОБКА ЦИФРОВОЇ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ

4.1. Час квантування цифрової системи керування

Дискретизація (квантування) – заміна неперервного сигналу тими чи іншими дискретними значеннями.

Види дискретизації: за часом; за рівнем; одночасна дискретизація за рівнем і за часом.

Задача вибору раціонального періоду квантування T_k є однією з основних проблем реалізації ЦСК. При зменшенні часу керування точність керування цифровою системою збільшується, але при цьому зростає завантаження мікроЕОМ. При збільшенні часу квантування втрачається важлива інформація про сигнал, що може призвести до неможливості відтворення вихідного сигналу за дискретними вибірками. Тому виникає проблема пошуку раціонального часу квантування T_k , який задовольнив би такі суперечливі вимоги.

Згідно з теоремою Котельникова для можливості безпомилкового відтворення сигналу, як показує аналіз амплітудних спектрів імпульсної системи, найменша частота квантування повинна дорівнювати $2\omega_c$, де ω_c – найвища частота вихідного сигналу, яка має місце в амплітудно-частотній характеристиці неперервної частини системи.

Теорема стверджує: якщо сигнал не містить в собі частот вище, ніж ω_c рад/с, він повністю описується своїми значеннями, вимірними у дискретні моменти часу за інтервалом $T_k = \pi/\omega_c$.

При подальших розрахунках нехтуємо передатною функцією виконавчого механізму внаслідок його малої інерційності.

Визначення передатної функції неперервної частини розімкненої системи:

$$W_{\text{роз.}}^{\text{н.ч.}}(s) = \frac{K_{\partial}}{T_{\partial}s + 1} \frac{K_{\text{оу}}e^{-\tau s}}{T_{\text{оу}}s + 1} = \frac{K_{\theta}K_o e^{-\tau s}}{T_{\theta}T_o s^2 + (T_{\theta} + T_o)s + 1}$$

$$W_{\text{роз.}}^{\text{н.ч.}}(s) = \frac{0,314e^{-118s}}{73410s^2 + 2477s + 1}$$

Визначаємо передатну функцію неперервної частини замкненої системи:

$$W_{\text{зам.}}^{\text{н.ч.}}(s) = \frac{W_{\text{роз.}}^{\text{н.ч.}}(s)}{1 + W_{\text{роз.}}^{\text{н.ч.}}(s)} = \frac{0,314e^{-118s}}{(73410s^2 + 2477s + 1) + 0,314e^{-118s}}$$

Визначення амплітудно-частотної характеристики неперервної частини замкненої системи:

$$W_{\text{зам.}}(jw) = \frac{0,314e^{-118jw}}{(73410jw^2 + 2477jw + 1) + 0,314e^{-118jw}}$$

У результаті розв'язання рівняння

$$A(w) = \frac{K_{\theta}K_o}{\sqrt{(-T_{\theta}T_o w^2 + 1 + K_{\theta}K_o)^2 + (T_{\theta}T_o)^2 w^2}} = 0,01$$

Отримаємо значення частоти за рис. 4.1.

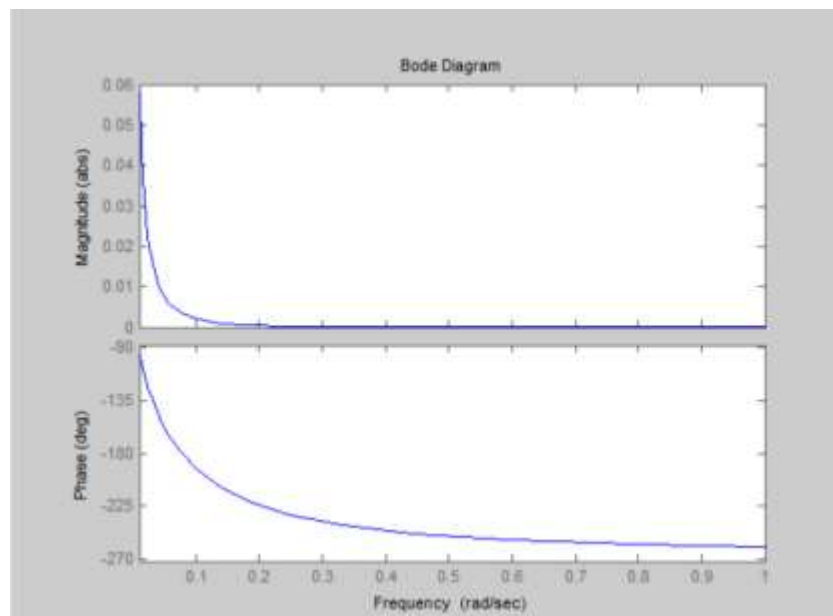


Рис. 4.1. Амплітудно-частотна характеристика САК підживлення рослин вуглекислим газом

Отримаємо значення частоти:

$$w_c = 0.05 \text{ 1/c}$$

і значення часу квантування:

$$T_k = \frac{\pi}{w_c} = 62.8 \text{ c.}$$

4.2. Реалізація цифрового ІІ-регулятора

У цифрових системах, аналогічно до неперервних систем, можна використовувати ІІ закон регулювання. Синтез ІІ-регулятора включає визначення параметрів K_p , K_i . Параметр інтегральної складової регулятора залежить від добротності за швидкістю K_v неперервної частини:

$$K_i = K_v \lim_{z \rightarrow 1} (z - 1) W_{н.ч}(z) \quad (4.1)$$

Добротність за швидкістю визначається залежно від постійної часу об'єкта (таблиця 4.1).

Таблиця 4.1

Співвідношення добротності за швидкістю від постійної часу об'єкта

T_o, c	K_v
~ 1	3...10
~ 10	0,3...1
~ 100	0,01...0,04
~ 1000	0,004...0,012

Відповідно до таблиці, де $K_v = 0,01$, і $T_{oy} = 2447$ секунд, визначаємо передатну функцію $W_{н.ч}(z)$. Для цього використовуємо пакет програм MATLAB (рис. 4.2), застосовуючи операції, які дозволяють перетворити передатну функцію неперервної системи на дискретну за допомогою Z-перетворення $wz = c2d(w, T)$.

де w – змінна, що отримала вираз неперервної передатної функції,

T – крок квантування.

В середовищі Matlab введемо команду:

wz=c2d(w,62.8)

Після чого отримаємо результат:

```
Transfer function:
0.02006 z^2 + 0.01335 z + 0.0001367
-----
z^3 - 0.9501 z^2 + 0.05174 z
- 2.002e-005

Sampling time: 62.8
```

Рис. 4.2. Визначення передатної функції $W_{н.ч.}(z)$

При синтезі ПІ-регулятора ми нехтуємо малою постійною часу SE .

Тоді:

$$K_i := \frac{0.01}{\left(\frac{0.002006 \cdot 1 + 0.01335 + 0.00013}{1^2 - 0.9501 \cdot 1 + 0.05174 + 0.00002} \right)} = 6.6$$

Після знаходження K_i параметр K_p визначаємо таким чином, щоб компенсувати полюс Z -перетворення неперервної частини системи.

Передатна функція ПІ-регулятора має вигляд:

$$W_{PI}(z) = \frac{K_i \cdot T}{2} \frac{z+1}{z-1} = \frac{2 \cdot K_p \cdot z - 2 \cdot K_p + K_i \cdot T \cdot z + K_i \cdot T}{2z-2} = \frac{(2 \cdot K_p + K_i \cdot T)z + (K_i \cdot T - 2 \cdot K_p)}{2(z-1)} = \frac{(2 \cdot K_p + K_i \cdot T) \left[z + \frac{K_i \cdot T - 2 \cdot K_p}{2 \cdot K_p + K_i \cdot T} \right]}{2(z-1)} \quad (4.2)$$

Для компенсації полюсу необхідно знайти такий K_p , який би задовольняв рівняння:

Параметр знаходимо за допомогою програми MathCAD (рис. 3.18.).

```
Given
(Ki·T - 2·Kp) / (Ki·T + 2·Kp) = 0.000197
Find(Kp) = 3.281
```

Рис. 4.3. Знаходження параметру K_p за допомогою програми MathCAD

Для аналізу показників ефективності роботи системи використовується модель у програмному середовищі Simulink (рис. 4.4).

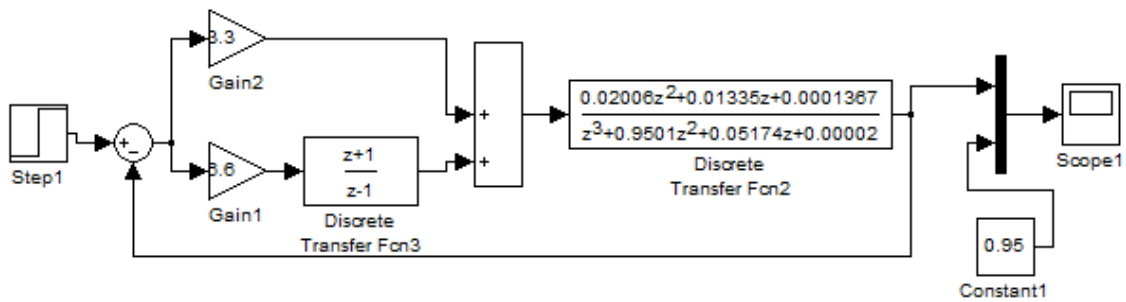


Рис. 4.4. Структурна модель цифрової системи

Та отримаємо перехідний процес системи з ПІ-регулятором (рис. 4.5).

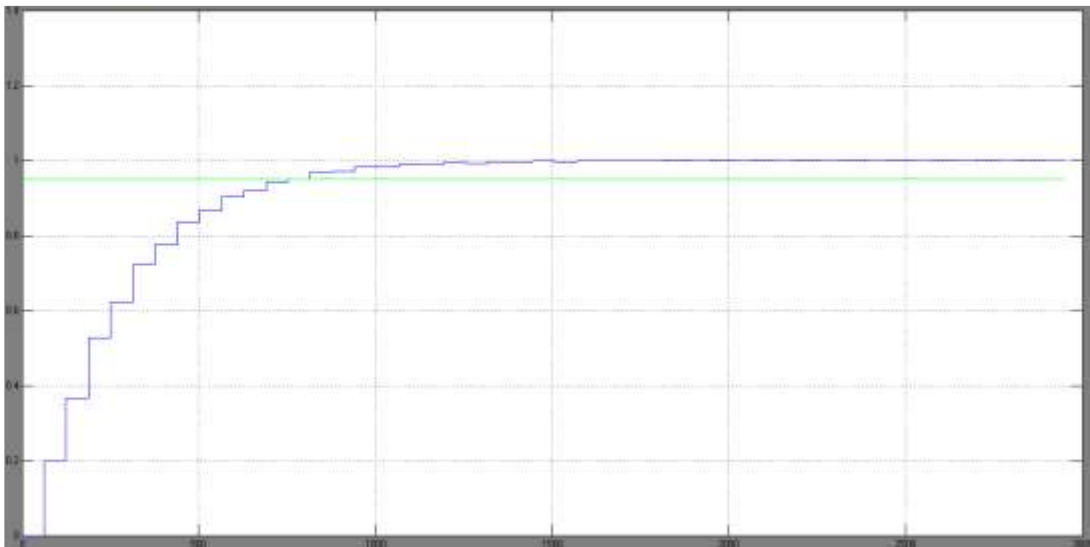


Рис. 4.5. Перехідний процес системи з ПІ-регулятором

4.3. Дослідження цифрової системи керування на стійкість та якість

Використовуючи відкриту передатну функцію цифрової системи $W_{роз}(z)$, знайдемо $W_{зам}(z)$, розв'яжемо рівняння та знайдемо характеристичні корені.

$$W(p) := \frac{33}{9.68e6 \cdot p^3 + 1.6676e6 \cdot p^2 + 58000.0 \cdot p + 133.0} \cdot \frac{28.4p - 18.2}{6.6p - 6.6}$$

Отримаємо рівняння в z -перетворенні

$$W(z) := \frac{142.0 \cdot z - 91.0}{(z - 1.0) \cdot (9.68e6 \cdot z^3 + 1.6676e6 \cdot z^2 + 58000.0 \cdot z + 133.0)}$$

У результаті було отримано наступне характеристичне рівняння:

$$9.68e6 \cdot z^4 - 8.0124e6 \cdot z^3 - 1.6096e6 \cdot z^2 - 57867.0 \cdot z - 133.0 = 0$$

Використавши програмне середовище Mathcad, знайдемо можливі корені рівняння:

$$z \cong (-0.0024653548578; -0.1253454446373; -0.0444619277777; 3)$$

Згідно критерію Джурі бачимо, що знайдені корені задовольняють вимоги стійкості:

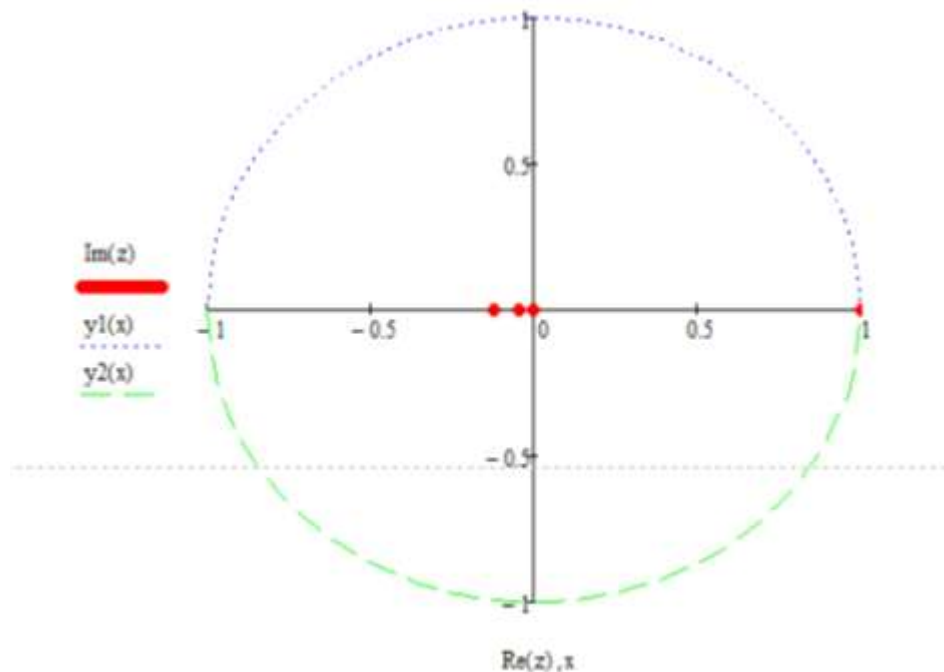


Рис. 4.6. Корені характеристичного рівняння на площині

Згідно рис. 4.5. визначаємо показники якості регулювання:

- час регулювання $t_p = 775$ с;
- перерегулювання $\sigma = 0$;
- коливальність $n = 0$.

РОЗДІЛ 5

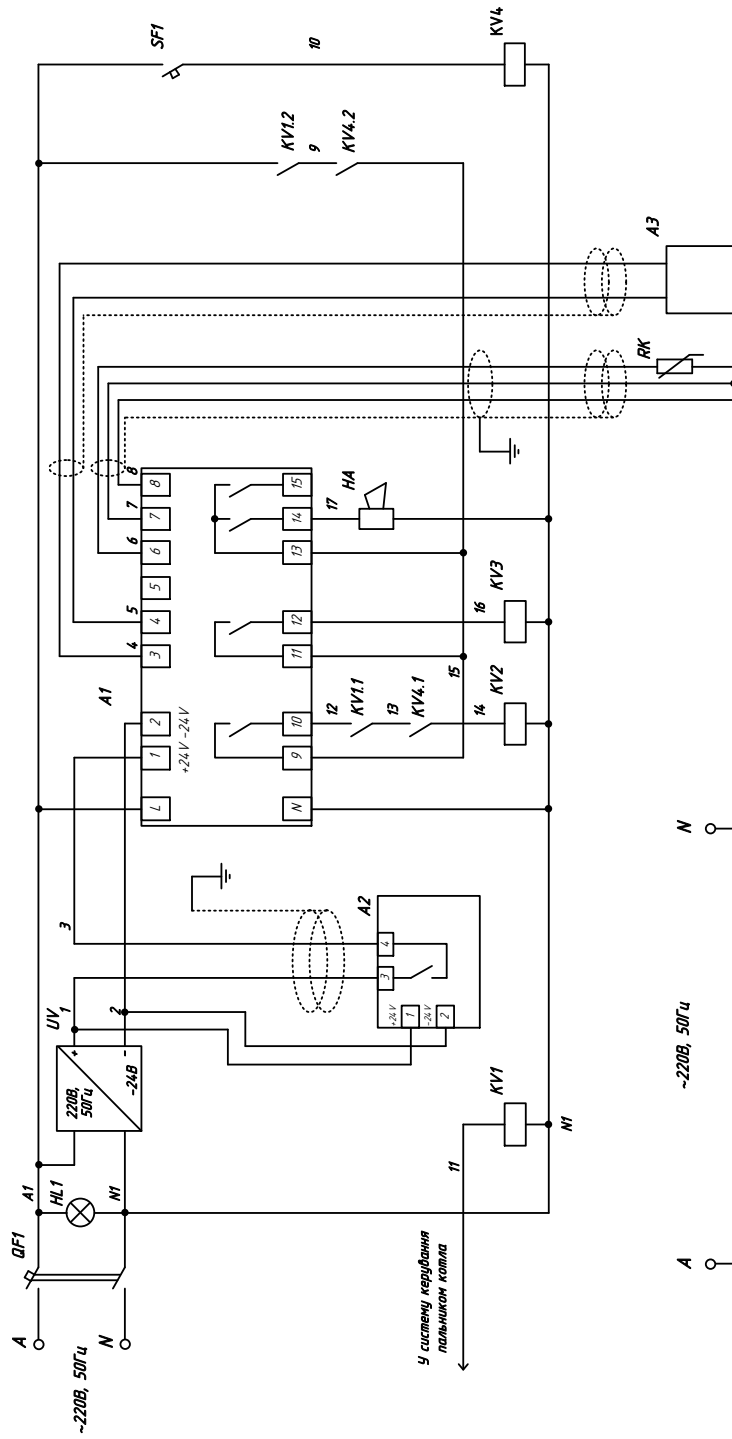
СХЕМИ СИСТЕМИ АВТОМАТИЗАЦІЇ

5.1. Розробка схеми електричної принципової системи керування підживленням рослин вуглекислим газом

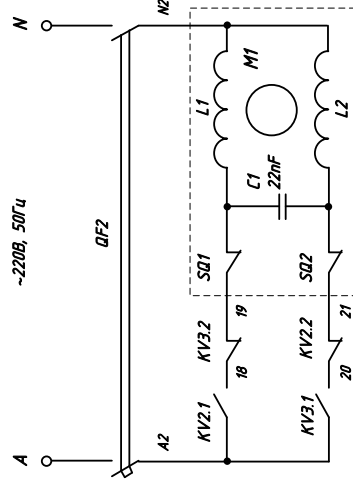
Схема електрична принципова системи керування підживлення рослин вуглекислим газом у теплиці зображена на рис. 5.1.

САК підживлення рослин вуглекислим газом складається з наступних елементів:

- 1) програмованого логічного контролера ОВЕН ПЛК73, який реалізує ПІ-алгоритм керування концентрацією вуглекислого газу в теплиці;
- 2) вимірювального модуля концентрації вуглекислого газу на основі датчика концентрації CO₂ TGS4160 та мікроконтролера FIC98648;
- 3) сервоприводу газового клапану LM230A-SR Velimo, за допомогою якого змінюється кількість димових газів із CO₂, що потрапляють у простір теплиці;
- 4) датчика температури PT-500 – платинового терморезистора із номінальною статичною характеристикою 500П (опір терморезистора 500 Ом при температурі 0°C), який використовується для запобігання потрапляння димових газів із високою температурою у транспортну систему при виході з ладу економайзера;
- 5) контрольно-захисного пристрою CO/NO Sercom, що призначений для запобігання потрапляння у простір теплиці отруйних газів – чадного газу (CO) та оксиду азоту (NO), які можуть утворюватись при неправильному налагодженні або порушенні регулювання пальника водогрійного котла;
- 6) блоку живлення 220/24 В 50 Гц;
- 7) електротехнічного обладнання - автоматичних вимикачів та проміжних реле для захисту та комутації системи керування.



У системі керування пальником кола



Позн. познач.	Найменування	Кіл.	Примітка
SF	Вимикач автоматичний ВА-2001-1А АСКО	1	$I_n = 1 А$
DF1	Вимикач автоматичний ВА-2001-2/2А АСКО	1	$I_n = 2 А$
DF2	Вимикач автоматичний ВА-2001-2/1А АСКО	1	$I_n = 1 А$
HL1	Лампа сигнальна СКГ-16.2 А-КМ-220	1	Червона
KV1, KV4	Реле напруги проміжне РП-21-210 УХЛ3	2	(2 зок.)
KV2, KV3	Реле напруги проміжне РП-21-210 УХЛ3	2	(1 зок. + 1 зок.)
A1	Програмований логічний контролер ОВЕН ПЛК73	1	
A2	Контрольно-захисний пристрій СД/МО Setcom	1	
A3	Вимірний модуль концентрації CO ₂ TGS4160	1	
UV	Блок живлення 220/24 В, 50 Гц	1	
M1	Сервопривод газодого клапану LM230A-SR Belimo	1	
RK	Терморелеавтомат типу РТ-500	1	

Рис. 5.1. Схема електрична принципова керування підживлення рослин вуглекислим газом у теплиці

Система автоматичного керування концентрацією вуглекислого газу в теплиці працює наступним чином.

Напруга живлення подається за допомогою автоматичних вимикачів QF1 та SF1 у коло керування САК та QF2 у коло керування сервоприводом M1.

Регулятор A1 отримує сигнали від контрольно-захисного пристрою A2 концентрації CO/NO, датчика температури димових газів RK, вимірювального модуля концентрації CO₂ в теплиці A3. Котушка проміжного реле KV1 отримує напругу живлення від системи керування пальником водогрійного котла у тому випадку, коли котел працює у нормальному режимі, замикаючи свої контакти KV1.1 та KV1.2 у колі керування.

За умови нормальної температури димових газів (до 50°C) та допустимої концентрації чадного газу (CO) та оксиду азоту (NO) у складі димових газів, регулятор A1 формує керуючі сигнали – напругу живлення проміжних реле KV2 та KV3, які, в свою чергу, подають живлення на сервопривод газового клапану M1 (KV3 – "менше" або закривання клапану, KV2 – "більше" або відкривання клапану).

У випадку, коли температура димових газів перевищує значення 50°C (що може призвести до руйнування транспортної системи подачі CO₂ до теплиць), або концентрація шкідливих газів CO/NO перевищує допустимі значення, регулятор A1 подає сигнал на закривання газового клапану сервоприводом M1 (припиняючи подачу димових газів у теплиці, відкриваючи шлях для викиду димових газів у навколишнє середовище), а також вмикає аварійну звукову сигналізацію (пристрій НА).

5.2. Розробка схеми електричної з'єднань САК підживленням рослин вуглекислим газом в теплиці

Згідно з ГОСТ 2.702-75 схеми з'єднань – це схеми, на яких зображують з'єднання складових частин установки або виробу. Вони розробляються на основі принципових схем живлення та використовуються під час виконання монтажних і налагоджувальних робіт.

Схеми з'єднань виконують на підставі таких загальних правил:

- схеми з'єднань розробляють на один щит, пульт, статор, станцію керування.
- усі типи апаратів, приладів та арматури, що передбачені принциповою електричною схемою, мають бути повністю відображені на схемі з'єднань;
- позиційне позначення приладів та засобів автоматизації, а також маркування ділянок кіл, що прийняті на принципових схемах, потрібно зберегти на схемі з'єднань.

Застосовують три способи виконання схем з'єднань: адресний, графічний і табличний. Для перших двох, крім зазначених вище правил, слід виконувати ще декілька:

- щит або шафу керування розвертають в одну площину, показуючи лише ті їхні конструкції, на яких розміщуються прилади та засоби автоматизації при цьому зберігають взаємне розміщення приладів та засобів автоматизації;
- прилади та засоби автоматизації показують спрощено без збереження масштабу у вигляді прямокутників, над якими розміщують кола, розподілені рисою навпіл; цифри над рисою вказують порядковий номер виробу (номера присвоюються по-панельно зліва направо і зверху вниз), а під

рискою - позиційне позначення цього виробу (відповідно до принципової електричної схеми). За потребою показують внутрішню схему апаратів.

- для кількох реле, що розміщені в одному ряду, внутрішню схему показують один раз, якщо вона у них одна й та сама.
- вивідні затискачі зображують колами, у середині яких показують їхнє заводське маркування; якщо у вивідних апаратів заводського маркування немає, то їх маркують умовно арабськими цифрами, що зумовлено пояснювальними надписами. Слід зазначити, що маркування проводів і позначення затискачів на схемах з'єднань є незалежними.
- платам, на яких розміщуються резистори, конденсатори та інші елементи, присвоюється лише порядковий номер (проставляється в колі над рисою); позиційне позначення елементів розміщують у безпосередній близькості від їхнього умовного графічного позначення.

Адресний спосіб є найбільш поширеним і полягає в тому, що лінії зв'язку між окремими елементами апаратів, які встановлюють на щиті або на пульті, не показують, а замість цього у місці приєднання проводу на кожному апараті або елементі проставляють цифрову або літерно-цифрову адресу того апарата або елемента, з яким він електрично має бути зв'язаний (позиційне позначення згідно з принциповою схемою) або порядковий номер елемента. Це не загромождає схему лініями зв'язку, що дає змогу її легко читати.

Схема електрична з'єднань САК підживлення рослин вуглекислим газом в теплиці зображена на рис. 5.2.

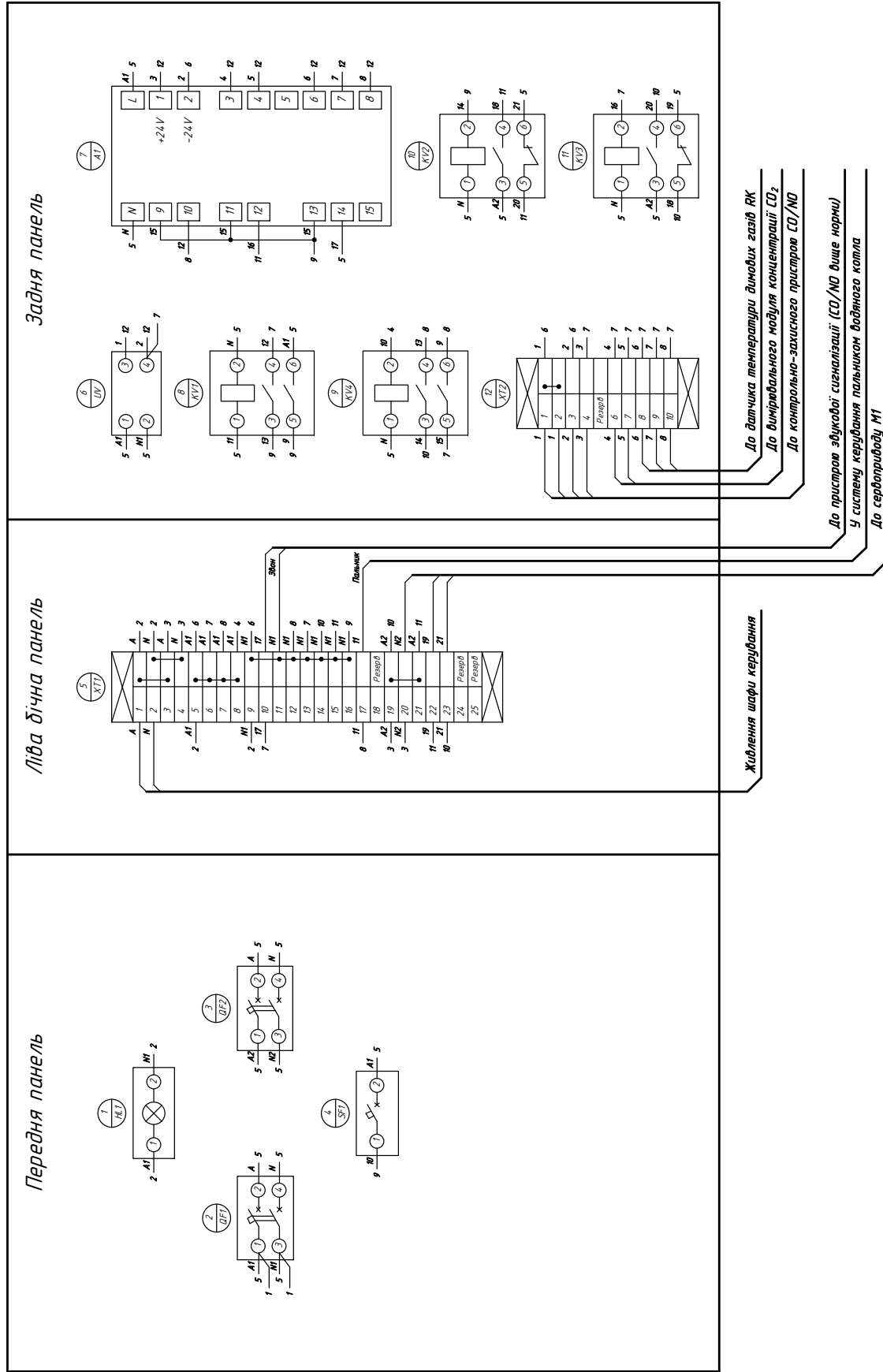


Рис. 5.2. Схема електрична з'єднань САК підживлення рослин вуглекислим газом в теплиці

5.3. Розробка схеми електричної підключень САК підживленням рослин вуглекислим газом в теплиці

Згідно з ГОСТ 2.702-75*, зазначені схеми показують зовнішнє підключення апаратів, установок щитів, пультів і т.д.

Практично використовують дві побудови схем підключень: графічну та табличну. Більш поширеною є графічна. При цьому умовними графічними позначеннями зображають:

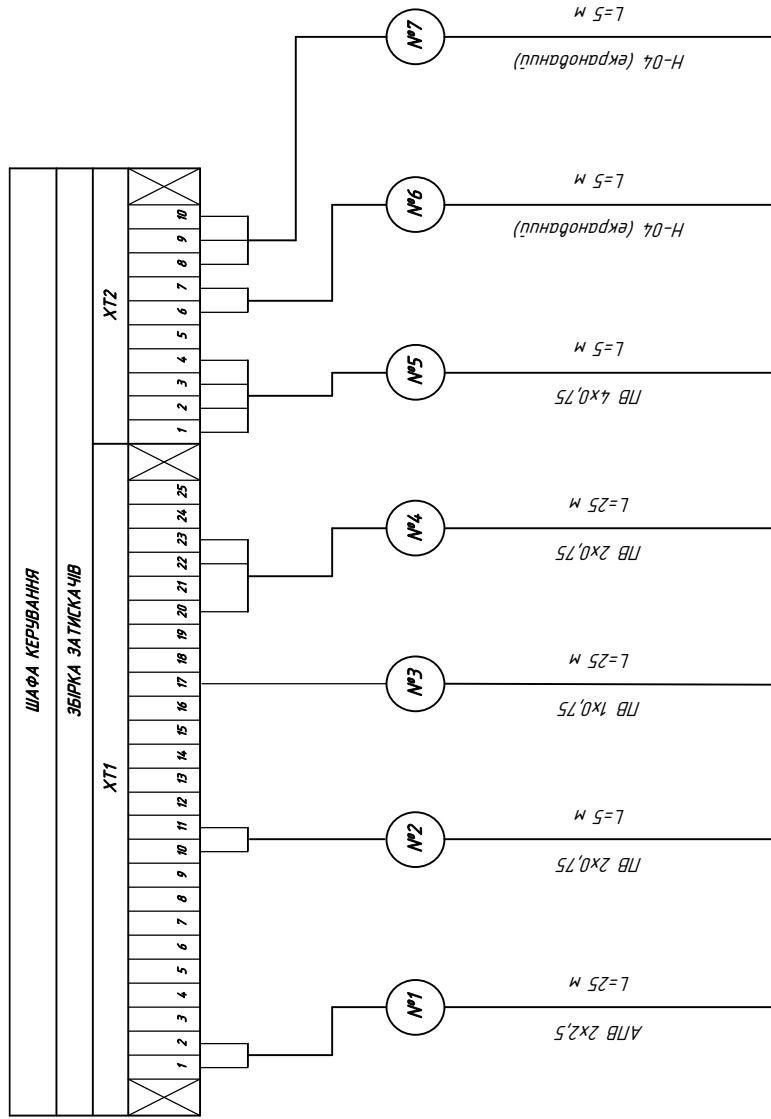
- відбірні пристрої та первинні перетворювачі;
- щити, пульти та локальні пульти керування контролю сигналізації та вимірювання;
- позашитові прилади та засоби автоматизації;
- з'єднувальні та протяжні коробки, вільні коробки кінців термопари, електропроводки та кабелі, що прикладаються поза щитами;
- вузли приєднання електропроводів і приладів, апаратів та коробок; забірну апаратуру, елементів для з'єднання та відгалуження;
- комутаційні затискачі, розміщені поза щитами;
- захисне заземлення.

Шафи, пульти, окремі прилади та апарати зображають у вигляді прямокутників або кіл, у середини яких розміщують відповідні надписи.

Зв'язки одного призначення на схемах підключень показують суцільні лінії, і лише в місцях приєднання для приладів виконавчих механізмів та до інших апаратів проводи розділяють, щоб провести їх маркування.

Схеми підключень виконують без збереження масштабу у вигляді, зручному для користування.

Схема електрична підключень САК концентрацією вуглекислого газу в теплиці зображена на рис. 5.3.



Назва обладнання	Живлення шафи керування	Збучкава сигналізація (CO/NO вище норми)	У систему керування пальником котла	Сервопривод газозого клапану	Контрольно-захисний пристрій CO/NO	Вимірвальний модуль концентрації CO ₂	Датчик температури димових газів
Тип, марка	ШШМ (600x400x250)У4.Р30	EBL-100	Viessmann Vitotop 200WS	LM230A-SR BELIMO	SERCOM CO/NO	TGS4160	PT-500

Рис. 5.3. Схема електрична підключень САК підживлення рослин вуглекислим газом в теплиці

5.4. Вибір апаратів захисту та керування

За електричною принциповою схемою системи керування підживленням рослин вуглекислим газом в теплиці, для захисту та комутації кола керування та кола живлення серваприводу використовується наступне обладнання:

- для подачі живлення та захисту кола керування від струмів короткого замикання використовуються автоматичні вимикачі QF1 (двохполюсний) та SF1 (однополюсний);
- для подачі живлення та захисту сервоприводу газового клапану від струмів короткого замикання використовується автоматичний вимикач QF2;
- для комутації окремих ділянок кола керування використовуються проміжні реле напруги KV1-KV4; для світлової сигналізації подачі напруги живлення у коло керування використовується сигнальна лампа HL1.

Вибір проміжних реле KV1-KV4. Проміжні реле для кола керування вибирають

- за напругою кола керування:

$$U_{н.РЕЛЕ} \geq U_{к.УПР}; \quad (5.1)$$

- максимальною комутаційною здатністю допоміжних контактів (струм кола керування повинен дорівнювати або бути меншим за номінальний струм реле):

$$I_{н.РЕЛЕ} \geq I_{к.УПР}; \quad (5.2)$$

- за кількістю та призначенням допоміжних контактів (нормально розімкнені, нормально замкнені, перемикаючі).

Згідно з принциповою схемою та умовами (5.1) та (5.2), вибираємо реле загального призначення типу РП-21-210 УХЛЗ (з 1 замикаючим, 1 розмикаючим контактом) – реле **KV2, KV3**, реле РП-21-210 УХЛЗ (з 2 замикаючими контактами) - реле **KV1, KV4**.

Перевагами цього типу реле є малі габаритні розміри, економічність, висока якість виконання контактів, велика комутаційна здатність, тривалий строк служби. Технічні характеристики реле наведені в таблиці 5.1.

Таблиця 5.1.

Технічні характеристики реле РП-21-210 УХЛЗ

Напруга живлення, В	240 (50 Гц)
Споживана потужність, ВА	3,5
Напруга керування, В	~ 12...220 , - 6...220
Номинальний струм контактів, А	5
Мінімальний струм контактів, А	0,025
Кількість контактів	(3з) + (3р)
Механічний ресурс, циклів	20 млн.
Робоча температура, °С	- 40...+ 55
Кліматичне виконання	УХЛ (за ГОСТ 15150-69)
Категорія розміщення	3 (за ГОСТ 15150-69)
Ступінь захисту корпусу / контактів	IP40 / IP00

Вибір лампи світлової сигналізації НЛ1. Для світлової сигналізації в колі керування вибираємо сигнальну лампу СКЛ-16.2 А-КМ-220 (червона) з підсвічуванням світлодіодною матрицею на 220 В, з вигнутим розсіювачем світла, з підключенням проводів під заживний гвинт М4.

Ступінь захисту IP54 (за ГОСТ14254-96), гарантований строк служби 10 років, гарантійне напрацювання на відмову – 25000 годин.

Вибір приладу звукової сигналізації НА. Для звукової сигналізації використаємо дзвоник гучного бою типу EBL-100 (АсКо Україна) з напругою живлення 220 В та струмом споживання 300 мА.

Вибір автоматичних вимикачів QF1, QF2, SF1. При виборі автоматичного вимикача для захисту споживачів від струмів короткого замикання необхідно дотримуватись наступних умов:

- номінальна напруга автоматичного вимикача має дорівнювати напрузі живлення електричної мережі або перевищувати її

$$U_{H.AB} \geq U_{Ж}; \quad (5.3)$$

- номінальний струм автоматичного вимикача повинен дорівнювати або перевищувати номінальний струм споживачів

$$I_{н.ав} \geq I_{н.сп}, \quad (5.4)$$

- номінальний струм електромагнітного та теплового розчіплювача повинен дорівнювати або перевищувати номінальний струм споживачів з подальшим регулюванням струму неспрацювання теплового розчіплювача на номінальний струм споживачів

$$I_{н.розч} \geq I_{н.сп}; \quad (5.5)$$

- для захисту електродвигунів – струм відсічки електромагнітного розчіплювача має становити 1,5...1,6 пускового струму електродвигуна

$$I_{відс.розч} \geq (1,5...1,6) \cdot I_{пуск.дв}, \quad (5.6)$$

Визначимо струм споживання споживачів, які необхідно захистити автоматичними вимикачами (таблиця 5.2).

Таблиця 5.2.

Визначення струму споживачів

Споживач	Напруга живлення $U_{ж}$, В	Споживана потужність $S_{ж}$, ВА	Струм споживання $I_{н.сп}$, А
Автоматичний вимикач QF1			
Програмований логічний контролер ОВЕН ПЛК73	220	7	0,032
Контрольно-захисний пристрій СО/NO Sercom	24	4,6	0,192
Котушки реле напруги РП-21-210 УХЛЗ (4 шт.)	220	4x3,5	0,064
Дзвоник гучного бою EBL-100	220		0,300
Всього			0,588
Автоматичний вимикач SF1			
Котушка реле напруги РП-21-210 УХЛЗ (1 шт.)	220	3,5	0,016
Автоматичний вимикач QF1			
Сервопривод газового клапану LM230A-SR Belimo	220	4	0,018

Згідно з принциповою схемою та умовами (6.3) - (6.5), вибираємо наступні автоматичні вимикачі:

QF1 – автоматичний вимикач ВА-2001-2/2А АСКО (таблиця 6.4) – двохполюсний автоматичний вимикач з номінальним струмом $I_H = 2 \text{ A}$, номінальною напругою $U_{H.AB} = 220/380 \text{ B}$;

QF2 – автоматичний вимикач ВА-2001-2/1А АСКО – двохполюсний автоматичний вимикач з номінальним струмом $I_H = 1 \text{ A}$, номінальною напругою $U_{H.AB} = 220/380 \text{ B}$;

SF1 – автоматичний вимикач ВА-2001-1А АСКО – однополюсний автоматичний вимикач з номінальним струмом $I_H = 1 \text{ A}$, номінальною напругою $U_{H.AB} = 220/380 \text{ B}$.

Таблиця 5.3.

Технічні характеристики автоматичного вимикача ВА-2001-2/2А АСКО

Номінальна напруга $U_{H.AB}$, В	220/380 (50, 60 Гц)
Номінальний струм $I_{H.AB}$, А	2
Номінальний струм електромагнітних розчіплювачів $I_{H.РОЗЧ}$, А	2
Уставка за струмом відсічки електромагнітного розчіплювача $I_{ВДС.РОЗЧ}$, А	$I_{ВДС.РОЗЧ} = 12 \cdot I_{H.РОЗЧ}$
Регулювання струму теплових розчіплювачів у межах, А	$0,9 \cdot I_{H.РОЗЧ} \dots 1,15 \cdot I_{H.РОЗЧ}$
Кількість полюсів	2
Категорія використання	А (за ГОСТ Р 50030.2)
Механічне виконання	М3, М4 (за ГОСТ 17516.1)
Кліматичне виконання	У3 (за ГОСТ 15150)
Клас зносостійкості	Б
Ступінь захисту (за ГОСТ 14254-96)	IP20 (корпус вимикача) IP00 (затискачі приєднання)

5.5. Вибір проводів та кабелів

Переріз струмопровідної жили проводу, шнура або кабелю вибирають, виходячи з умов гранично допустимого його нагрівання та достатньої механічної міцності. Під час визначення кількості проводів, які прокладають в одній трубі (або жил багатожильного провідника), нульовий провід чотирипровідної системи трифазного струму (або заземлюючу жилу) не враховують.

Площу поперечного перерізу жил проводів, шнурів і кабелів вибирають за тривало допустимим струмом

$$I_{\text{тр.доп}} \geq I_{\text{розр}}, \quad (5.7)$$

де $I_{\text{розр}}$ - розрахунковий струм ділянки електричної мережі, А.

Для відгалужень до окремих електроспоживачів за максимальні тривалі робочі струми беруть їх номінальні струми.

Враховуючи умову (5.7) та відповідні номінальні значення струмів споживачів (таблиця 5.2), вибираємо наступні проводи:

- для підключення живлення до шафи керування – кабель АПВ 2х2,5 (ГОСТ 16442-70) – провід з алюмінієвими жилами, полівінілхлоридною ізоляцією, перерізом струмопровідних жил 2,5 мм², тривало допустимий струм якого дорівнює 19 А [4]. Кабель прокладається в трубі.

- для живлення кола керування – провід ПВ1х0,75 (ГОСТ 6323-79) – провід з мідною жилою перерізом 0,75 мм² в полівінілхлоридній оболонці, тривало допустимий струм якого дорівнює 11 А [4].

- для підключення вимірювального модуля концентрації CO₂ в теплиці та датчика температури димових газів – сигнальний кабель Н-04 (рис. 5.4) – екранований 4-жильний кабель із мідними монолітними жилами перерізом 0,22 мм², ізоляція жил – полівінілхлоридна, ізоляція кабелю – полівінілхлоридна. Екран виконаний із алюмінієвої фольги.



Рис. 5.4. Сигнальний кабель Н-04

5.6. Вибір щита керування

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

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

Згідно з вище вказаними нормативними документами щити і пульти розраховано, на розміщення їх у закритих приміщеннях із температурою навколишнього середовища від -30 до +50°C за відносної вологості не більше як 80%. Промисловість випускає також щити та пульти спеціального призначення, які розраховані на більш високі або низькі температури,

підвищену вологість, наявність агресивного середовища тощо. Щити та пульти умовно позначають згідно з вимогами ОСТ 36.13-76.

Шафові щити використовують:

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

Враховуючи габаритні розміри усіх пристроїв схеми керування концентрацією вуглекислого газу в теплиці, вибираємо щит шафовий малогабаритний типу ЩШМ (600x400x250)V4IP30 (ОСТ 36.13-76) [14].

5.7. Розробка засобів візуалізації технологічного процесу

Візуалізація - метод подання інформації у вигляді оптичного зображення (наприклад, у вигляді малюнків і фотографій, графіків, діаграм, структурних схем, таблиць, карт і т. д.).

При візуалізації керування використовують такі підходи:

- SCADA SYSTEM (TRACE MODE, Genesis);
- контролер з панеллю оператора;
- контролер з дисплеєм.

Вибір технічних засобів для забезпечення візуалізації залежить від кількості інформації та величини ОК. У разі масштабних об'єктів використовують SCADA-системи.

SCADA – програмний комплекс для візуалізації та диспетчеризації технологічних процесів. SCADA-система дає наочне уявлення процесу і

надає, як правило, графічний інтерфейс оператора для контролю і керування.

Враховуючи об'єм технічних засобів, було виконано візуалізацію інтерфейсу оператора за допомогою SCADA TRACE MODE (AdAstrA), яка є одним з рішень автоматизації технологічних процесів (АСУТП), і розроблено автоматизовану систему контролю та керування параметрами мікроклімату в промисловій теплиці.

Розроблена SCADA-система дозволяє виконувати головні задачі технологічного процесу керування параметрами мікроклімату в промисловій теплиці:

- ефективно керувати та контролювати технологічним процесом;
- забезпечити високий рівень надійності та безпеки;
- оптимізувати витрати енергоресурсів;
- отримувати дані в режимі реального часу;
- мати доступ до проєкту з будь-якого місця;
- реалізувати підсистему підтримки прийняття рішень.

Нижче представлено результат роботи.

На головному екрані SCADA-системи (рис. 5.4) відображається весь технологічний процес зі зазначеними показами датчиків (у відповідних одиницях), значення керуючої дії (у відсотках) та статус електродвигунів (ввімкнене / вимкнене). Додатковими кнопками керування можна задавати режим роботи (ручний/автоматичний), задавати налаштування ПІ-регулятора, відображати вікно з графіками температури, відображати вікно аварійних станів, та споживання електричної енергії системою керування.

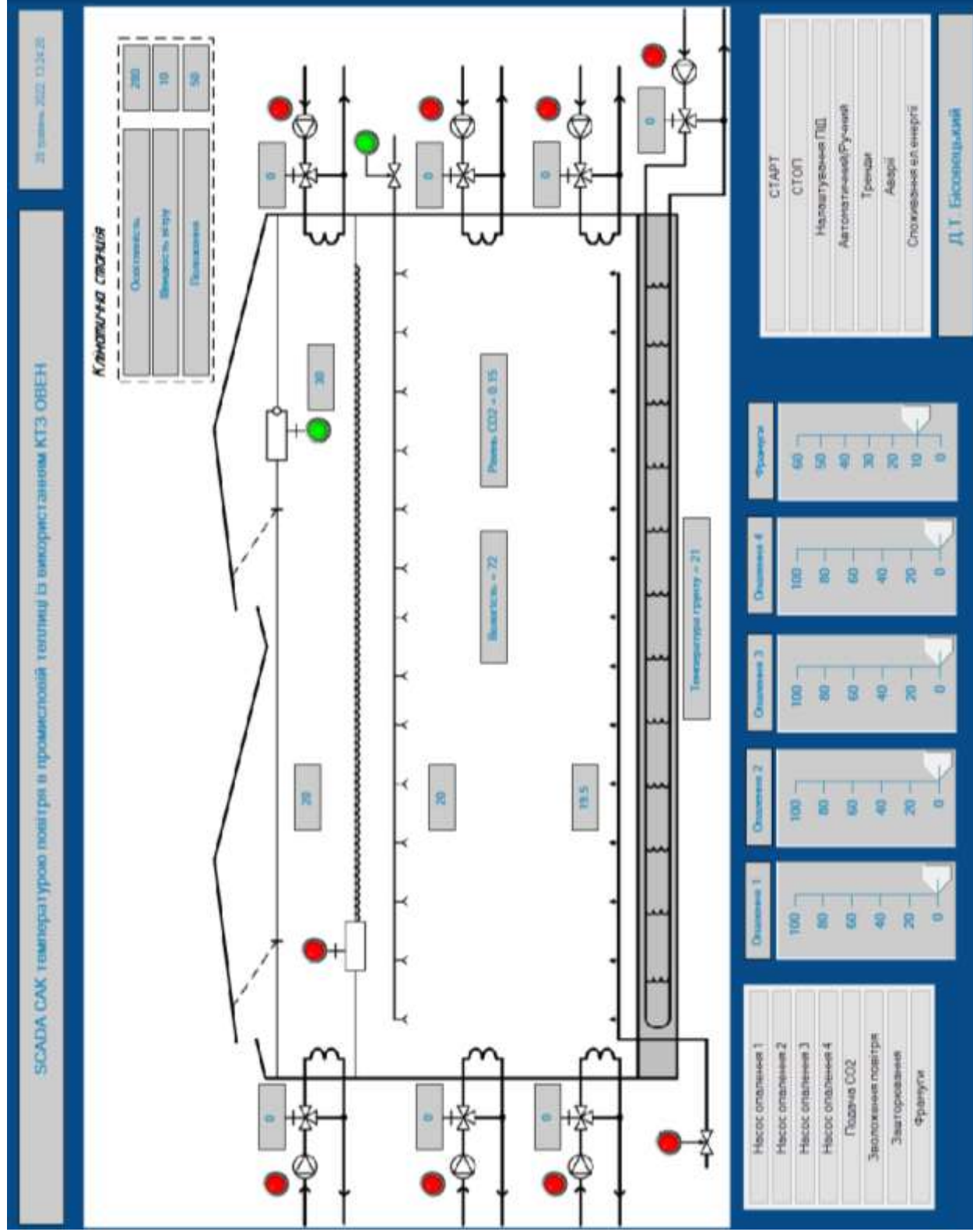


Рис. 5.5. Головний екран SCADA-системи керування параметрами мікроклімату в промисловій теплиці

РОЗДІЛ 6

ЕКОНОМІЧНА ОЦІНКА ЕФЕКТИВНОСТІ САК ПІДЖИВЛЕННЯМ РОСЛИН CO₂ В ТЕПЛИЦІ

Оцінку економічної ефективності впровадження САК підживленням вуглекислим газом рослин у теплиці проведемо за методикою, запропонованою в дослідженні [12].

Для визначення економічної ефективності запропонованої САК концентрацією CO₂ в спорудах захищеного ґрунту виникає задача встановити закономірності динаміки балансових витрат CO₂ і обґрунтувати ефективний спосіб регулювання концентрації CO₂ в теплиці з числа вже відомих або вже запропонованих. В якості альтернативних проведемо дослідження для двох характерних типів процесу:

- **природний**, при незмінній концентрації CO₂, що дорівнює 0,03% (300 ppm);
- **розробленої САК концентрації CO₂** за рахунок зовнішньої подачі двоокису вуглецю.

Опишемо основні об'єкти моделі.

Індекси: порядковий номер кроку інтегрування протягом світлового дня - i , ($i = 1, 2, \dots, 20$); номер розрахункового дня вегетації рослин - j , ($j = 1, 5, 10, \dots, 90$); тип альтернативного процесу - ϑ (1, 2).

Основні змінні: змінні параметри моделі діляться на дві групи: 1 – керовані, 2 – некеровані. До некерованих відносять параметри радіаційного режиму та росту посіву.

$$\left. \begin{aligned} \bar{E}_{ij} &= \frac{K_N \cdot K_\Phi \cdot A_0}{1 + \eta \cdot L(T_j)} \cdot E_A(t_i, T_j); \\ E_A(t_i, T_j) &= S_0 \cdot S_i \cdot (i \cdot \Delta h_0) \cdot (1 + q_0); \\ \Delta h_0 &= \frac{\frac{\pi}{2} - y + \delta_j}{10}; \\ \delta_j &= \delta_1 \cdot T_j - \delta_0 \end{aligned} \right\} \quad (6.1)$$

де y - географічна широта місця розташування СЗГ.

$$L(T_j) = S \cdot L_0 \cdot N \cdot S_i \cdot \frac{\pi \cdot T_j}{180}, \quad (6.2)$$

а також рівні вентиляції теплиць, які залежать від падаючого на зовнішню поверхню теплиці потоку сонячної радіації $E_A(t_i, T_j)$, так і від температури зовнішнього середовища. Внаслідок недостатності експериментальних даних вказану залежність моделювали наближеним виразом

$$\omega_{ij} = 0,05 \cdot (L(T_j) - 1) \cdot E_A,$$

з урахуванням очевидних обмежень

$$0\% \leq \omega_{ij} \leq 100\%. \quad (6.3)$$

Додатково відмітимо, що моделювання змінних $L(T_j)$ та ω_{ij} необхідно уточнювати, але для порівняльних розрахунків такі функціональні залежності є достатньо прийнятними.

До регульованого параметру відноситься концентрація вуглекислого газу C_{ij}^g .

Вихідні дані. Вихідними даними моделі є місцезнаходження СЗГ – широта місця y , статичні параметри моделі фотосинтезу листя досліджуваної культури (розділ 3), конструктивні характеристики тепличного приміщення (об'єм теплиці V та площа S_T), вартість вуглекислого газу Z , собівартість продукції базового варіанту $S^{(B)}$.

Складові балансових співвідношень. В процесі розрахунку за імітаційною моделлю отримуються значення потоків невиробничих втрат за виразом:

$$G_{(V)ij}^g = x \cdot \exp(K_V \cdot \omega_{ij}) \cdot (C_{ij}^g - 300) / S_T, \quad (6.4)$$

та потоків CO₂, що асимілюються одиницею посіву

$$G_{(AC)ij}^g = L(T_j) \cdot \frac{L \cdot \tau \cdot E_{ij} \cdot C_{ij}^g}{L \cdot E_{ij} + \gamma + \tau \cdot \left(1 + \frac{L \cdot E_{ij}}{P_0}\right)} \cdot R. \quad (6.5)$$

Обчислення питомих денних витрат CO₂ проводиться чисельним інтегруванням поточних потоків $G_{(V)ij}^g$ та $G_{(AC)ij}^g$ протягом кожного світлового дня від сходу до заходу сонця із шагом Δt , вегетаційних витрат – із шагом ΔT .

У результаті отримуються денну суму витрати CO₂ невиробничої складової процесу

$$F_j^g = \left(0,5 \cdot G_{1(V)j}^g + \sum_{i=2}^{19} G_{(V)ij}^g + 0,5 \cdot G_{(V)20j}^g \right) \cdot \Delta t, \quad (6.6)$$

та складової фотосинтетичної продуктивності рослин

$$P_j^g = \left(0,5 \cdot G_{1(AC)j}^g + \sum_{i=2}^{19} G_{(AC)ij}^g + 0,5 \cdot G_{(AC)20j}^g \right) \cdot \Delta t. \quad (6.7)$$

Подальше інтегрування денних витрат дозволило отримати кінцеві вегетативні витрати вуглекислоти

$$N^g = \left(0,5 \cdot F_1^g + \sum_{j=2}^{17} F_j^g + 0,5 \cdot F_{18}^g \right) \cdot \Delta T; \quad (6.8)$$

$$M^g = \left(0,5 \cdot P_1^g + \sum_{j=2}^{17} P_j^g + 0,5 \cdot P_{18}^g \right) \cdot \Delta T. \quad (6.9)$$

де N^g - невиробнича витрата CO₂ з вентиляльованим повітрям за розрахунковий період росту рослин; M^g - витрата CO₂ на асиміляцію одиницею посіву за той самий період для кожного з розглянутих процесів.

Балансові складові зміни собівартості продукції. Складові критерію, що характеризує додаткові витрати на проведення процесу та приріст продукції при цьому визначаються за виразами:

$$\Delta R^g = Z \cdot \Delta N^g, \quad (6.10)$$

$$\Delta N^g = N^g + M^g - M^1, \quad (6.11)$$

$$\Delta Q^g = \varepsilon_{IP} \cdot (M^g - M^1), \quad (6.12)$$

$$Q_1 = \varepsilon_{\text{ПР}} \cdot M^1, \quad (6.13)$$

де ΔR^g - сумарні витрати ресурсів на організацію процесу підживлення вуглекислим газом, грн./м²;

ΔN^g - додаткові витрати CO₂, кг/м²;

ΔQ^g - приріст продуктивності, кг/м²;

Q^1 - продуктивність рослин для базового варіанту;

$\varepsilon_{\text{ПР}}$ - коефіцієнт продуктивності.

Отримані дані використовуються для розрахунку наступного інтегрального критерію

$$\delta S = \frac{\frac{\Delta R^g}{S^1} - \Delta Q^g}{\Delta Q^1} \cdot 100\%, \quad (6.14)$$

де δS - зміна відносної до базової собівартості продукції за рахунок підживлення вуглекислим газом, %.

Описана імітаційна модель була реалізована у наступному варіанті. Моделювання роботи альтернативних варіантів систем реалізовано протягом 90 днів, починаючи з 1 лютого. Обчислювальні можливості розглянутого алгоритму імітації були перевірені шляхом моделювання денного ходу інтенсивності сонячної радіації з кроком, що дорівнює 5 днів, причому на кожному парному кроці j моделювали сонячний день, на кожному непарному – похмурий. В якості параметрів моделі фотосинтезу використовували дані розділу 3. Вартість вуглекислоти змінювали в діапазоні від 0 до 3 грн./кг. Собівартість огірка приймали рівною 21 грн./кг, томатів – 42 грн./кг, коефіцієнт продуктивності $\varepsilon_{\text{ПР}} = 2$ [12].

Результати чисельного моделювання. Результати моделювання залежності функціонала (6.14) від вартості CO₂ представлені в таблицях (додаток А2, Г1). На рис. 6.1 зображені залежності функціоналу (6.14), на рис. 6.2 побудовані залежності основних складових виразу (6.14)..

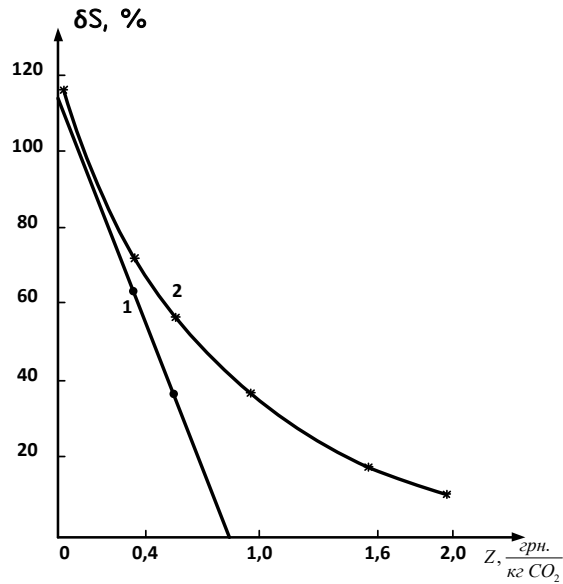


Рис. 6.1. Залежність відносних значень зниження собівартості продукції томату від вартості двоокису вуглецю:

- 1 – для природного режиму;
2 – для розробленої САК;

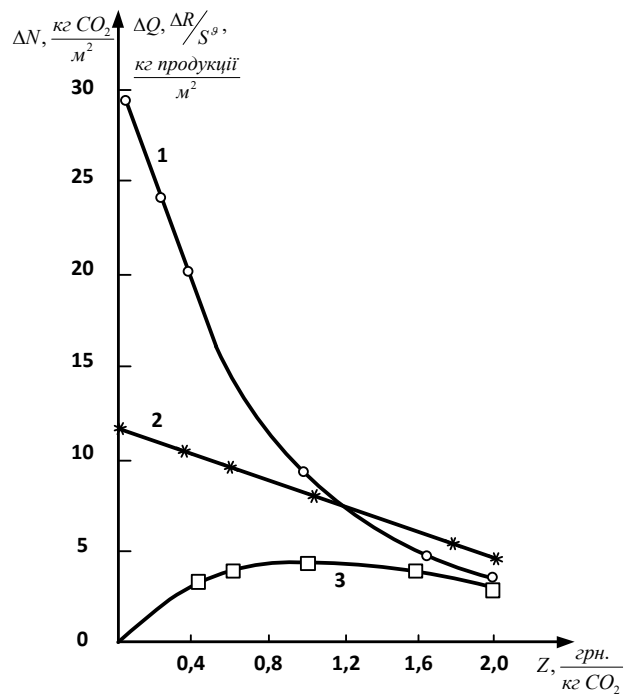


Рис. 6.2. Залежність складових економічного балансу процесу підживлення вуглекислим газом для розробленої САК концентрації CO₂;

- 1 – додаткові сумарні витрати CO₂, ΔN;
2 – додаткова продукція, ΔQ;
3 – еквівалентні втрати продукції, $\frac{\Delta R}{S^g}$;

ВИСНОВКИ

У кваліфікаційній магістерській роботі досліджені процеси створення мікроклімату в сучасних промислових блочних теплицях для вирощування овочів, зокрема підживлення рослин вуглекислим газом, і отримані наступні результати.

1. Із зростанням концентрації вуглекислого газу в теплиці C та збільшенням площі листової поверхні рослин S_L відбувається монотонне зростання швидкості асиміляції. При низьких значеннях рівня природного світла ($E_A < 50 \text{ Вт/м}^2$) рослини не мають необхідності у підвищеній концентрації CO_2 , оскільки у цих умовах у рослині переважає процес дихання і вони самі виділяють CO_2 .

2. Дослідження математичної моделі процесу переносу і асиміляції CO_2 в культиваційному приміщенні показали, що в досліджуваному діапазоні факторів навколишнього середовища (освітленості E_A та вентиляції ω_0) значення постійної часу T_{0y} та коефіцієнта передачі k_{0y} теплиці для каналу керування концентрацією CO_2 визначаються в основному рівнем вентиляції теплиці (значення постійної часу теплиці може змінюватись в діапазоні від 3800с до 660с при зміні рівня вентиляції від 0 до 100%).

3. Розроблена САК концентрацією CO_2 в теплиці неперервної дії на основі вимірювального модуля з датчиком TGS4160, сервоприводу газового клапану LM230A-SR Velimo та програмованого логічного контролера із ПІ-алгоритмом керування має наступні показники якості роботи: перерегулювання $\sigma = 0\%$; коливальність $n = 0$; час регулювання $t_{рег} = 775 \text{ с}$.

4. Порівняльний аналіз економічної ефективності впровадження САК концентрації CO_2 в теплиці показав, що результируючий техніко-економічний показник розробленої системи є вищим (на 71...9% для культури огірка та на 93...11% для культури томату), ніж у режиму природного вуглекислотного обміну рослин.

ЛІТЕРАТУРА

1. Аутко А.А. Овочівництво захищеного ґрунту. Технології, інновації, економіка / А.А. Аутко, Г.И. Гануш, Н.Н. Долбик. – К: ВВР, 2006. – 311 с.
2. Біхеле З.Н., Молдау Х.А., Росс Ю.К. Математичне моделювання транспірації та фотосинтезу рослин при нестачі ґрунтової вологи. – К.: Вища школа, 1991. – 222 с.
3. АПК-19-07. Тепличні і оранжерейні підприємства. Споруди захищеного ґрунту для фермерських (селянських) господарств: Відомчі норми технологічного проектування. [Чинний від 2007-08-01]. Вид. офіц. Київ: М-во аграр. політ. України, 2007. 140 с.
4. Дипломне проектування енергетичних та електротехнічних систем в агропромисловому комплексі: навч. посіб. для студентів вищих навчальних закладів / Іноземцев Г.Б., Козирський В.В., Лут М.Т., Радько І.П., Синявський О.Ю. – 2-ге вид., перероб. – К., 2014. – 526 с.
5. Іваненко В.Ф. Енергетичний моніторинг і економічна оцінка тепличних господарств / В.Ф. Іваненко // Продуктивність агропромислового виробництва. – 2012. – №21. С.58–66.
6. Ельтерман В.М. Вентиляція хімічних виробництв. – 3-е вид. перероб. – К.: Вища школа, 2001. – 288 с.
7. Лактіонов І.С., Вовна О.В., Зорі А.А. Комп'ютеризовані вимірювачі комплексу фізичних параметрів ґрунтів та мікроклімату промислових теплиць: монографія. Покровськ: ДВНЗ «ДонНТУ», 2016. – 212 с.
8. Мартиненко І.І., Лисенко В.П., Тищенко Л.П., Лукач В.С. Проектування систем електрифікації та автоматизації сільського господарства. – К.: Вища школа, 1999. – 201 с.
9. Мікрокліматичні основи тепличного овочівництва / Пер. із болг. Є.С. Сігаєва. Із перед. Н.С. Гончарука. – К.: Вища школа, 2002. – 175 с.
10. Міненко С.В., Савченко В.М., Крот В.В. Аналіз залежності інтенсивності продуктивного фотосинтезу від режимів мікроклімату в індустриальних теплицях. Вісник ЖНАЕУ. 2016. № 1 (53), т. 1. С. 270–276.
11. Моргун В.В., Стасик О.О., Кірізій Д.А., Прядкіна Г.О. Зв'язок реакції фотосинтетичних показників і зернової продуктивності на ґрунтову посуху в контрастних за стійкістю сортів озимої пшениці. Фізіологія рослин і генетика. 2016. Т. 48. № 5. С. 371–381.
12. Новіков Е.П. Автоматичне управління подачею двоокису вуглецю в спорудах захищеного ґрунту із використанням мікро-ЕОМ: дис. ... канд. техн. наук / Е.П. Новіков. – Київ, 1991. – 181 с.
13. Основи автоматики: теорія і практика (ч.1) / Лисенко В.П., Решетюк В.М., Цигульов І.Т. – К.: Освіта України, 2012. – 540 с.

14. Основні методи і методики підготовки кваліфікаційної роботи бакалавра / В.П. Лисенко, А.О. Дудник, В.О. Мірошник, А.А. Руденський, Н.А. Заєць. – Київ: "Компринт". 2023. – 303 с. для студентів зі спеціальності 151 – "Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології" Навчальний посібник.
15. Особливості автоматизації у спорудах закритого ґрунту: монографія // В. П. Лисенко, А.О. Дудник, Т.І. Лендел. – К. : НУБіП України, 2017. – 153 с.
16. Павлов В.З. Експериментальна оцінка інфільтрації повітря в теплицю // Механізація і електрифікація сільського господарства – 1976. - №7. – С.18-20.
17. Паламарчук В.Д., Поліщук В.С., Мазур А, Паламарчук О.Д. Новітні агротехнології в рослинництві: підр. Вінниця: 2017. – 602 с.
18. Решетюк, В. М. Вибір структури та розробка моделі системи керування мікрокліматом при ідентифікації теплиці в класі біотехнічних систем. / Решетюк, В. М., Мірошник, В. О., Лендел, Т. І., Куляк, Б. В. // Енергетика та автоматика. – 2017. № 2. - С. 116-127.
19. Решетюк В.М., Мірошник В.О. Типові технологічні процеси і об'єкти виробництва. – К.: Видавничий центр НУБІПУ, 2008. – 62 с.
20. Сиротенко О.Д. Математичне моделювання водного та теплового режиму і продуктивності агроecosystem. – К.: Урожай, 1991. – 167 с.
21. Сучасне овочівництво захищеного та відкритого ґрунту: Навч. посібник для агр. навч. закладів I-IV рівнів акредитації за спец. 1310 "Агрономія" / Білогубова Е.Н., Васильєв А.М., Гіль Л.С. та ін. – К.: ПАТ "Видавництво "Київська Правда", 2006. – 528 с.
22. Щиренко В.В., П.П. Говоров, І.А. Велит, Р.В. Пилипчук. Джерела світла для вирощування овочів в умовах закритого ґрунту. Навчальний посібник для студентів спеціальності "Світлотехніка та джерела світла". // Тернопіль: Джура, 2011. – 156 с. ISBN 978-966-185-062-9.
23. Промислові теплиці типу «Venlo»
Електронний ресурс. Режим доступу: <https://www.agrotechnical.net.ua/uk/industrial-greenhouses-of-the-venlo-type/>
24. Ainsworth E. A., Long S. P. What have we learned from 15 years of free-air CO₂ enrichment? A meta-analytic review of the responses of photosynthesis, canopy properties and plant production to rising CO₂. *New Phytologist*. 2005. Vol. 165. P. 351–372.
25. Good Agricultural Practices for greenhouse vegetable production in the South East European countries / W. Baudoin et al. Rome: FAO, 2017. 449 p.
26. Fitzgerald G., Luo Q., et al. Response of wheat growth, grain yield and water use to elevated CO₂ under a free-air CO₂ enrichment experiment and modeling in a semi-arid environment. *Glob. Chang. Biol*. 2015. Vol. 21. 2670–2686.

ДОДАТКИ

ДОДАТОК А1

Розрахункові швидкості асиміляції двоокису вуглецю рослинами
в процесі вегетації рослин

Концентрація CO ₂ , ppm	Швидкість асиміляції CO ₂ рослинами, M , мг/с											
	Листовий індекс, L_0 , м ² /м ²											
	0,5				1,5				2,5			
	Щільність потоку сонячної радіації, E_A , Вт/м ²											
	50	150	250	450	50	150	250	450	50	150	250	450
Культура – огірок												
200	-16	7	26	54	-56	0	47	124	-103	-24	45	159
300	-14	14	37	75	-51	16	74	172	-96	-3	81	224
400	-12	18	45	89	-48	26	92	205	-92	11	105	270
500	-11	22	50	100	-45	33	105	230	-87	21	122	303
700	-10	26	58	115	-43	43	122	264	-85	34	145	348
1000	-9	29	65	129	-40	51	137	294	-81	45	165	388
1300	-8	32	69	137	-39	56	145	313	-80	51	176	412
1600	-8	33	72	142	-38	59	152	329	-78	56	184	428
1900	-8	34	74	147	-37	62	156	335	-77	58	190	440
Культура – томат												
200	-9	0	8	18	-30	-7	12	40	-54	-21	6	49
300	-8	4	13	26	-28	0	23	60	-51	-12	22	77
400	-7	5	16	32	-26	5	31	75	-49	-5	33	97
500	-7	7	19	37	-25	8	37	86	-48	0	41	112
700	-6	9	22	44	-24	12	45	101	-46	5	51	132
1000	-6	11	25	50	-23	16	52	115	-47	8	60	151
1300	-6	12	27	54	-22	18	56	123	-44	13	66	162
1600	-5	12	28	57	-22	20	59	129	-43	15	69	169
1900	-5	13	29	58	-22	21	61	133	-43	16	72	175

ДОДАТОК А2

Результати моделювання денної динаміки витрати CO₂ в процесі росту рослин (індекси: 1 – природний режим; 2 – режим стабілізації CO₂ на рівні 2000 ppm; 3 – регулювання концентрації за виразом (2.20))

Поточний час світлового дня, год. хв.	Номер дня	Витрати вуглекислого газу, мг CO ₂ / (м ² · с)					
		на асиміляцію посівом, ×10 ³			на вентиляцію		
		G_{AC}^1	G_{AC}^2	G_{AC}^3	G_V^1	G_V^2	G_V^3
Томат							
8.00	10	14	32	15	3.1	0	0.5
9.00		29	66	43	3.1	0.4	1.1
10.00		37	88	63	3.1	0.7	1.6
11.00		41	101	75	3.1	0.9	1.9
12.00		43	105	80	3.1		
7.11	50	51	122	89	4.5	1.0	0.8
8.23		118	265	214	6.5	2.2	2.1
9.35		155	364	294	8.6	3.2	3.2
10.42		175	422	337	10.3	3.8	4.0
12.00		181	441	350	10.9	4.0	4.2
Огірок							
6.21	90	202	407	315	6.1	1.4	1.1
7.46		455	906	715	12.0	3.1	2.6
9.11		614	1280	1005	16.7	4.7	3.8
10.35		701	1511	1232	16.7	5.9	5.0
12.00		728	1588	1311	16.7	6.3	5.5

ДОДАТОК Б1

Технічні характеристики ПЛК73 ОВЕН

Параметр	Показник
Живлення	
Напруга живлення, В постійного струму змінного струму (47...63Гц)	150...300 (номінальна 230) 90...264 (номінальна 110/230)
Споживана потужність, не більше для постійного струму, Вт для змінного струму, ВА	12 18
Пусковий струм, А, не більше - при напрузі 90 В - при напрузі 230 В - при напрузі 264 В	4,2 15 19
Тривалість перехідного процесу, мс не більше - при напрузі 90 В - при напрузі 230 В - при напрузі 264 В	2 1,5 1,5
Параметри вбудованого вторинного джерела живлення вихідна напруга, В струм, мА, не більше	24±3 180
Цифрові (дискретні) входи	
Кількість входів	8
Напруга живлення входів, В	24±3
Макс. вхідний струм дискретного входу, мА, не більше	11 (при напрузі живлення 30 В)
Рівень сигналу "логічної одиниці" для постійної напруги, В (струм в колі)	15...30 (не менше 4,5 мА)
Рівень сигналу "логічного нуля" для постійної напруги, В (струм в колі)	3...5 (не менше 1,5 мА)
Мінімальна тривалість імпульсу, що сприймається входом, мс	5
Макс. частота сигналу, що подається на дискретний вхід	15 Гц (при скважності 2)
Гальванічний розв'язок	Груповий (по 4 входу в групі)
Електрична стійкість ізоляції, В	1500 (між групами та ін. колами)

Технічні характеристики ПЛК73 ОВЕН (продовження)

Параметр	Показник
Аналогові входи	
Кількість аналогових входів	8
Тип датчиків, що підключаються	термоопір (ТО), термopара (ТП), уніфіковані сигнали струму або напруги
Повний час перетворення вхідного сигналу: - ТО, с, не більше - ТП із включеною компенсацією холодного спаю, датчики з уніф. сигналами постійного струму і напруги, с, не більше	0,8 0,4
Період вибірки для 8 входів - ТО, с, не більше - ТП і датчики з уніфікованими сигналами постійного струму і напруги, с, не більше	6,4 3,2
Гранична допустима основна приведена похибка при вимірюванні, % - ТО, с, не більше - ТП і датчики з уніфікованими сигналами постійного струму і напруги	$\pm 0,5$ $\pm 0,25$
Гранична приведена похибка при вимірюванні в усьому температурному діапазоні, % - ТО, с, не більше - ТП і датчики з уніфікованими сигналами постійного струму і напруги	1,375 0,688
Розрядність АЦП, біт	15
Дискретні виходи (контакти електромагнітних реле)	
Кількість релейних виходів каналів	від 1 до 4 (виходи DO5...DO8)
Макс. струм, що комутується контактами реле, А, не більше	1 (для змінної напруги до 250В та $\cos\varphi > 0,4$); 4 (для змінної напруги до 250В та $\cos\varphi > 0,8$); 4 (для постійної напруги до 100В)
Механічний ресурс реле, циклів перемикання, не менше	300000 при макс. навантаженні 500000 при 0,5 макс. навантаження

Технічні характеристики ПЛК73 ОВЕН (продовження)

Параметр	Показник
Дискретні виходи (оптопарі транзисторні п-р-п типу)	
Кількість вихідних каналів	від 4 до 8 (виходи DO1...DO8)
Макс. струм, що комутується, мА, не більше	400 (при напрузі до 60В пост. струму)
Дискретні виходи (оптопарі симісторні)	
Кількість вихідних каналів	від 1 до 4 (виходи DO5...DO8)
Макс. струм, що комутується, мА, не більше	50 (при напрузі не більше 300В змінного струму)
Дискретні виходи (зовнішнє твердотільне реле)	
Кількість вихідних каналів	від 1 до 4 (виходи DO5...DO8)
Вихідна напруга, В	від 4 до 6, в залежності від опору навантаження
Макс. вихідний струм, мА, не більше	50 мА
Аналогові виходи (ЦАП "параметр-напруга 0...10 В")	
Кількість вихідних каналів	від 1 до 4 (виходи DO5...DO8)
Діапазон вихідного сигналу, В	від 0 до +10
Опір навантаження, Ом, не менше	2000
Напруга зовнішнього джерела живлення, В	від 15 до 27
Споживаний струм, мА, не більше	10
Аналогові виходи (ЦАП "параметр-струм 4...20 мА")	
Кількість вихідних каналів	від 1 до 4 (виходи DO5...DO8)
Діапазон вихідного сигналу, мА	від 4 до 20
Опір навантаження, Ом, не менше	900
Напруга зовнішнього джерела живлення, В	від 15 до 27, живлення від струмової петлі
Інтерфейси зв'язку	
Інтерфейси	RS-485, RS-232
Режим роботи інтерфейсів	Master, Slave
Кількість RS-485	від 0 до 2
RS-232	від 0 до 2
Ресурси і додаткове обладнання	
Центральний процесор	RISC - процесор на базі ядра ARM-7, 32-ох розрядний, 50 МГц
Розмір Retain-пам'яті (EEPROM), байт	448
Об'єм оперативної пам'яті для зберігання змінних даних програм, кб	10
Об'єм пам'яті зберігання програм, кб	280

ДОДАТОК Б2

Схеми електричні принципові підключення датчиків та виконавчих механізмів до програмно-логічного контролера ПЛК73 ОВЕН та модулів розширення вводу та виведення

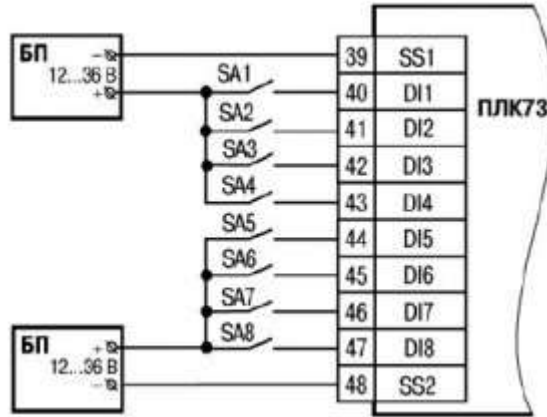


Схема підключення датчиків до дискретних входів ПЛК73

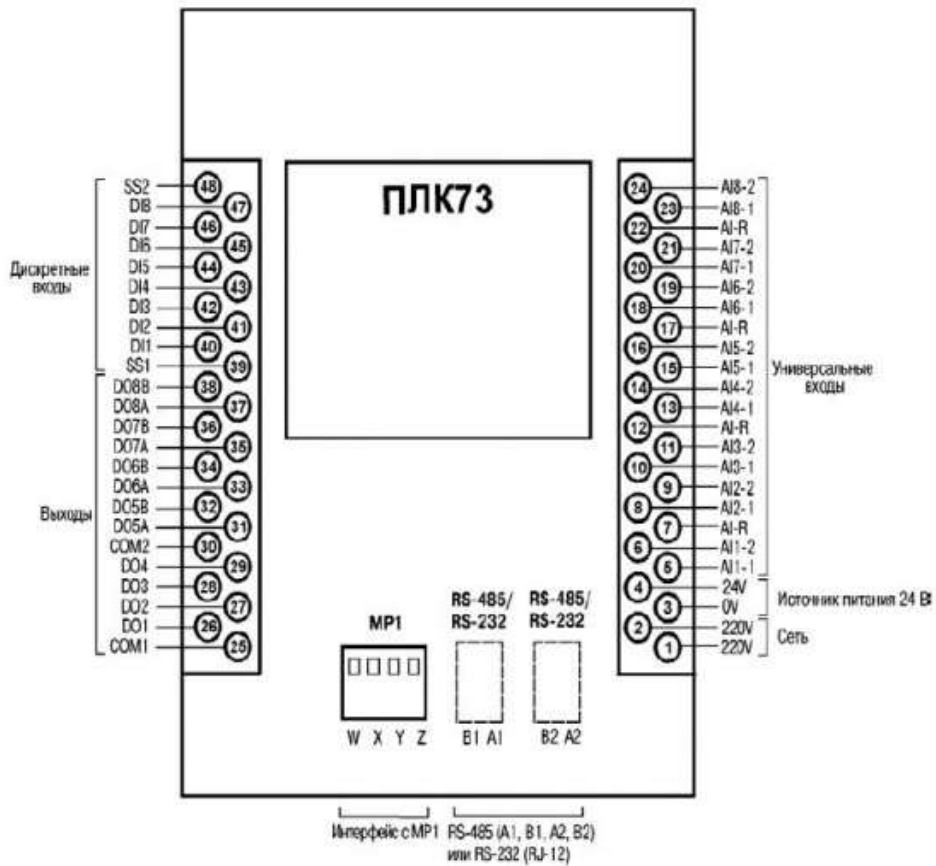
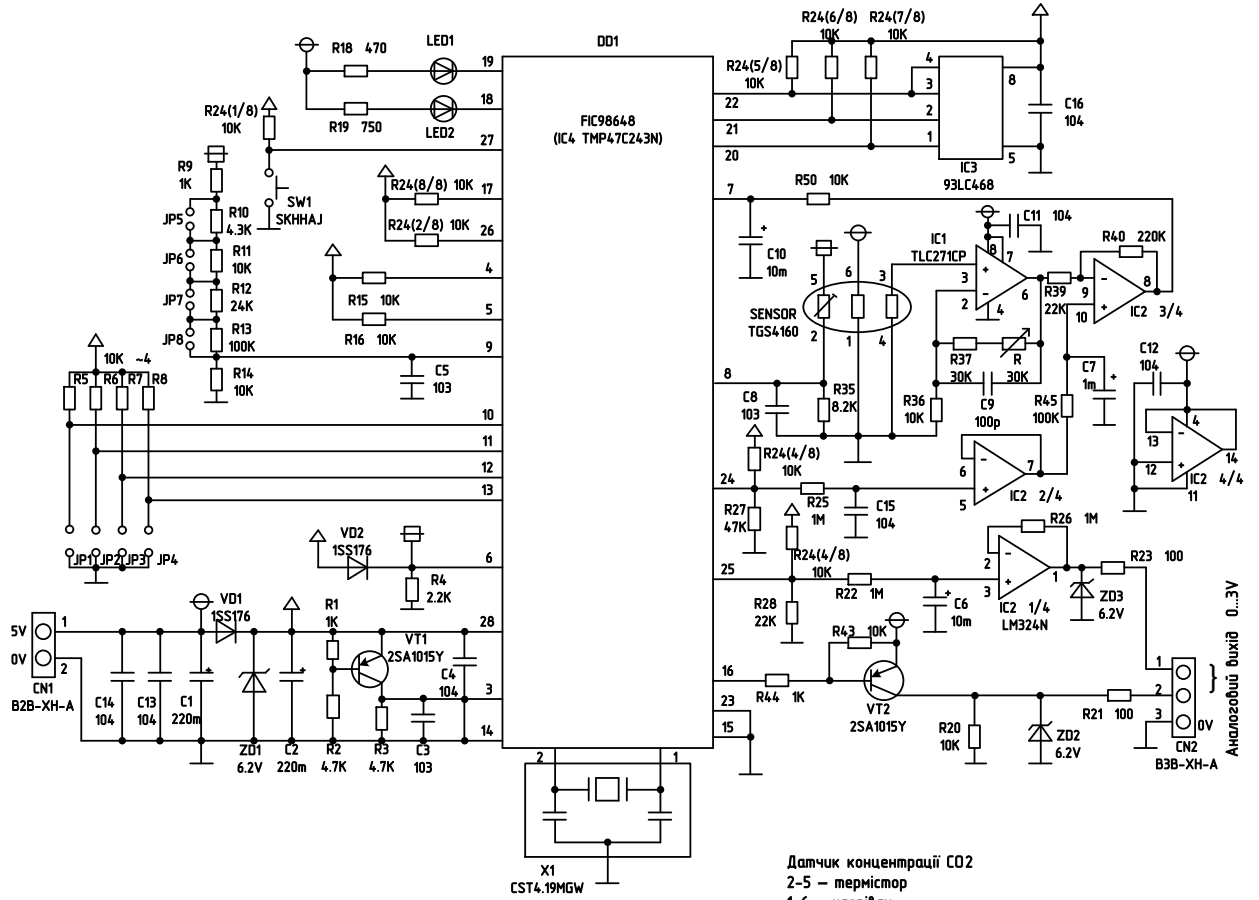


Схема розташування та призначення клем на ПЛК73 ОВЕН

ДОДАТОК В1

Вимірювальний модуль концентрації CO₂ в теплиці



Позиц. познач.	Найменування	Кіл.	Примітка
DD1	Мікропроцесор FIC98648	1	
VT1, VT2	Транзистор 2SA1015Y	1	
IC1	Підсилювач операційний TLC271CP	2	
IC2	Підсилювач операційний LM324N	1	
IC3	Підсилювач операційний 93LC468	1	
VD1, VD2	Діод 1SS176	2	
X1	CST 4.19MHz	1	
R1, R9, R44	Резистор 1 кОм	3	
R2, R3	Резистор 4,7 кОм	2	
R4	Резистор 2,2 кОм	1	
R5, R6, R7, R8	Резистор 10 кОм	4	
R10	Резистор 4,3 кОм	1	
R11, R14, R15, R16	Резистор 10 кОм	4	
R12	Резистор 24 кОм	1	
R13, R45	Резистор 100 кОм	2	
R20, R24, R36, R43	Резистор 10 кОм	4	
R18	Резистор 470 Ом	1	
R19	Резистор 750 Ом	1	
R21	Резистор 100 Ом	1	
R22, R25	Резистор 100 МОм	2	
R27	Резистор 47 кОм	1	
R28, R39	Резистор 22 кОм	2	
R35	Резистор 8,2 кОм	1	
R37	Резистор 30 кОм	1	
R40	Резистор 220 кОм	1	
C1, C2	Конденсатор 220 нФ	2	
C3, C5, C8	Конденсатор 103 мФ	3	
C4, C11, C16	Конденсатор 104 мФ	7	
C6, C10	Конденсатор 10 мФ	2	
C7	Конденсатор 1 мФ	1	
C9	Конденсатор 100 пФ	1	

ДОДАТОК Г1

Результати чисельного розрахунку значень балансових складових собівартості продукції при використанні альтернативних режимів підживлення рослин вуглекислотою протягом 90 днів вегетації посіву в теплиці площею 0,1га

Собівартість 1кг CO ₂ , грн./кг	Сумарна питома витрата вуглекислоти, кг/м ²				Додаткові витрати CO ₂ , грн./м ²		Додаткова продукція, кг/м ²		
	Z	N ⁽²⁾	N ⁽³⁾	M ⁽²⁾	M ⁽³⁾	ΔR ⁽²⁾	ΔR ⁽³⁾	ΔQ ⁽²⁾	ΔQ ⁽³⁾
Огірок									
0,00	29,2	29,2	2,2	2,2	0	0	2,4	2,4	
0,40	29,2	19,1	2,2	2,1	12,2	8,0	2,4	2,2	
0,60	29,2	13,9	2,2	2,0	18,2	9,0	2,4	1,9	
1,00	29,2	8,3	2,2	1,8	30,4	9,2	2,4	1,5	
1,60	29,2	4,4	2,2	1,6	48,6	7,8	2,4	1,1	
2,00	29,2	2,8	2,2	1,4	60,8	6,4	2,4	0,8	
3,00	29,2	0,6	2,2	1,1	91,2	2,0	2,4	0,2	
Томат									
0,00	29,2	29,22	0,9	0,9	0	0	1,1	1,1	
0,40	29,2	19,10	0,9	0,9	11,4	7,8	1,1	1,0	
0,60	29,2	13,85	0,9	0,8	17,8	8,6	1,1	0,9	
1,00	29,2	8,14	0,9	0,7	29,8	8,6	1,1	0,7	
1,60	29,2	4,08	0,9	0,6	47,6	6,8	1,1	0,5	
2,00	29,2	2,51	0,9	0,5	59,8	5,4	1,1	0,3	
3,00	29,2	0,44	0,9	0,4	89,4	1,4	1,1	0,1	