МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
УМАНСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ САДІВНИЦТВА

Факультет економіки і підприємництва

Кафедра інформаційних технологій

Допущено до захисту

"_____" _____ 2023 р.

Зав. кафедри, к.т.н., доцент

_____ **Ліщук Р.І.**

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА БАКАЛАВРА

Розробка інформаційної підсистеми моніторингу мікроклімату теплиць

Виконав – студент 4 курсу, групи 41-кн
освітньої програми "Комп'ютерні науки"
спеціальності 122 Комп'ютерні науки
Шкільний Дмитро Юрійович
Науковий керівник – д.т.н., професор
Кучерук Володимир Юрійович

Умань – 2023

Перелік умовних позначень, скорочень і термінів

FAO	Food and Agriculture Organization
ASABE	American Society of Agricultural and Biological Engineers
ФАР	Фотосинтетична активна радіація
ОВП	Окислювально-відновлювальний потенціал

Вступ

У теперішній час комп'ютеризовані системи знаходять все більше прикладне використання, що обумовлює безперервний пошук науково обґрунтованих шляхів їх розвитку.

Однією з таких галузей, потреби якої вимагають невідкладної модернізації шляхом упровадження сучасних комп'ютерних, сенсорних, інфокомунікаційних та мікропроцесорних технологій, є сільське господарство.

На сьогоднішній день однією з найбільш важливих галузей, із точки зору забезпечення продовольчої безпеки та цілорічної доступності продуктів харчування, є овочівництво захищеного ґрунту. Підтвердженням цього факту є динамічне зростання площ теплиць у світі.

Варто зазначити, що більшість досліджень присвячені питанням розробки апаратних і програмних рішень вимірювачів окремих параметрів. Незважаючи на якісне вирішення певних задач розробки програмно-апаратного забезпечення інформаційних підсистем, теорія комплексного моніторингу стану аналізованих фізичних середовищ перебуває в стадії становлення.

Основними питаннями, що потребують додаткового розвитку на базі відомих теорій є: облік принципів системності й комплексності збору та обробки розподіленої вимірювальної інформації; поглиблення теоретичних основ обґрунтування локацій сенсорів; розвиток фізико-математичного апарату екстраполяції результатів лабораторного моніторингу на реальні об'єкти; облік взаємозв'язків вимірюваних параметрів під час інтерпретації інтегрального стану середовища.

Актуальність

Прикладні аспекти застосування інформаційних підсистем, як наукоємність і масштабність сучасного тепличного овочівництва, які задекларовано всесвітньо визнаними організаціями FAO і ASABE на підставі узагальнення багаторічного експертного досвіду, диктують тенденції до вирішення методологічних питань побудови інформаційних підсистем комплексного моніторингу стану

аналізованих середовищ. Таким чином, відомі результати наукових досліджень не спроможні забезпечити необхідні показники ефективності та інформативності під час протікання технологічних процесів тепличного вирощування без проведення додаткових досліджень із обґрунтування теорії якісного переходу від вимірювань розподілених параметрів до моніторингу інтегрального стану середовища. Все це обумовлює певний дисбаланс між теорією та практикою, що полягає у фрагментарності відомих результатів по відношенню до вимог прикладного застосування інформаційних підсистем агротехнічного призначення.

Отже, розробка інформаційних підсистем моніторингу стану мікроклімату теплиць є актуальною.

Об’єкт дослідження – Об’єктом дослідження є стан мікроклімату теплиць.

Предмет дослідження є методи та засоби комп'ютеризованого моніторингу стану мікроклімату теплиць.

Мета дослідження

Метою бакалаврської кваліфікаційної роботи є розробка є розробка інформаційної підсистеми моніторингу стану мікроклімату теплиць.

Під час виконання кваліфікаційної роботи бакалавра був проведений аналіз наукової та технічної літератури, технічної документації, міжнародних стандартів у даній предметній галузі, а також проведено розробку математичного та програмного забезпечення підсистеми.

РОЗДІЛ 1. АНАЛІТИЧНИЙ ОГЛЯД ПРЕДМЕТНОЇ ОБЛАСТІ

1.1. Об’єкт та предмет дослідження

Дослідження теплиць є важливим інструментом для вчених та інженерів, які вивчають вплив мікрокліматичних параметрів на характеристики зростання значного асортименту рослин. Тепличне середовище дозволяє проводити експериментальні дослідження зі встановлення закономірностей впливу параметрів мікроклімату на ефективність вирощування культур на захищених ґрунтах безперервно протягом року. Процедури моніторингу результатів є важливим аспектом забезпечення високої якості вирощування рослин у тепличних умовах.

На теперішній час існує потреба у проведенні якісних досліджень у даній предметній області у всьому світі задля подальшого порівняння, аналізу й встановлення актуальних проблем, що виникли в галузі овочівництва захищеного ґрунту. Згідно аналізу відомих результатів світовий науковий досвід доводить, що дослідникам рекомендується виконувати комплексну оцінку інтегрального впливу параметрів на якість вирощування тепличних культур із обов'язковим оприлюдненням отриманих результатів.

Кислотно-лужний режим. Показник кислотності поливного розчину і тепличних ґрунтів (pH) відіграє основну роль у визначенні робочих показників під час процесів вирощування овочевих культур на захищених ґрунтах. Основні вимоги до якості поливної води, що є основним фактором впливу на кислотно-лужний режим ґрунтів, наведено у табл. 1.1. Оптимальні значення кислотності робочого поливного розчину в тепличних умовах становлять: для томатів – від 5,5-6,2 од., для огірків – від 5,8-6,5 од.

Вологісний режим. Значний вплив на процеси зростання тепличних культур відіграє вологісний режим ґрунтів і повітря. Вологісний режим підлягає оптимізації шляхом регулювання вмісту вологи в повітрі та ґрунті, що забезпечує водний баланс рослин. Шляхом регулювання водного режиму тепличних культур можна активно впливати на продуктивність їх зростання.

Таблиця 1.1 – Вимоги до якості поливної води в тепличних комплексах

Показник	Допустимий вміст у поливній воді
pH	від 6 до 8
Загальний вміст солей, кг/м^3	від 1,0 до 1,2
Оксид калію, оксид магнію, кг/м^3	0,02
Сульфати, кг/м^3	0,35
Оксид натрію, кг/м^3	від 0,15 до 0,18
Хлор, кг/м^3	від 0,15 до 0,18
Залізо, мг/л	1,0
Бор, мг/л	від 0,3 до 0,6
Фтор, мг/л	від 0,6 до 1,0
Цинк, мг/л	від 1,0 до 2,0
Загальна жорсткість, мг-екв/л	від 4,0 до 4,5
Феноли та діючі на смак сполуки	не допускаються
БПК повн. мг O_2/л	від 3,0 до 6,0

Показник поточної вологості ґрунту повинен узгоджуватися з іншими параметрами мікроклімату на певному етапі зростання. Для поливу рослин у теплицях використовується основний вид поливу – дощування або крапельний (мікрокрапельний), а в якості резервного – полив зі шлангу.

Витрати води задля поливу рослин під час вирощування в тепличних умовах приймаються у відповідності до даних у табл. 1.2 – 1.4 [1].

Таблиця 1.2 – Витрати поливної води за умови роботи системи випарного охолодження й зволоження при ясному небі

Географ. широта, °пн. ш.	Макс. добова витрата, л/м^2	Місяці				Річна витрата, л/м^2
		березень-жовтень, л/м^2	квітень-вересень, л/м^2	травень-серпень, л/м^2	червень-липень, л/м^2	
44	12,6	141	211	282	352	1972
48	11,7	130	197	262	327	1832
52	10,7	120	180	240	300	1680
Примітка: для об'єктів, які розташовані на іншій географічній широті, норми витрати води слід визначати методом інтерполяції.						

Таблиця 1.3 – Витрати води на один полив у промислових теплицях із вирощування овочевих культур

Місяць	Витрати води на один полив, л/м^2					
	Огірки			Томати		
	зимово-весняний цикл	осінній цикл	перехідний цикл	зимово-весняний цикл	осінній цикл	перехідний цикл
Січень	4	–	5	–	–	15
Лютий	5	–	5	10	–	15
Березень	5	–	5	12	–	15
Квітень	6	–	6	14	–	15
Травень	6	–	7	15	–	16
Червень	6	–	6	16	–	16
Липень	6	4	–	16	15	15
Серпень	5	5	–	15	15	–
Вересень	–	6	6	–	15	14
Жовтень	–	7	7	–	14	16
Листопад	–	8	6	–	12	15
Грудень	–	–	5	–	–	15
Примітка: коефіцієнт рівномірності поливу має дорівнювати від 0,8 до 0,9.						

Таблиця 1.4 – Кількість поливів у промислових теплицях із вирощування овочевих культур

Місяць	Кількість поливів					
	Огірки			Томати		
	зимово-весняний цикл	осінній цикл	перехідний цикл	зимово-весняний цикл	осінній цикл	перехідний цикл
Січень	6–8	–	12–15	–	–	–
Лютий	10–12	–	15–18	4–5	–	4–5
Березень	15–20	–	18–20	6–8	–	6–8
Квітень	20–25	–	20–23	8–10	–	9–11
Травень	20–25	–	20–25	10–12	–	12–14
Червень	25–30	–	25–30	10–12	7–9	10–15
Липень	25–30	18–20	–	10–12	8–10	8–10
Серпень	20–25	15–20	–	8–10	6–8	–
Вересень	–	10–12	3–4	–	4–6	7–8
Жовтень	–	5–8	10–14	–	3–4	4–6
Листопад	–	3–4	14–16	–	–	4–5
Грудень	–	–	12–15	–	–	4–5
Примітка: при використанні технології крапельного поливу витрати поливної води є на 30 % менше.						

У промислових теплицях із вирощування овочевих культур крапельний полив відбувається циклічно від 2 до 20 разів на добу, тривалість циклу дорівнює від 5 хв. до 30 хв. Задля підтримання оптимального вологісного режиму тепличних ґрунтів промислові теплиці мають бути обов'язково обладнані СВОЗ.

Температурний режим тепличних ґрунтів змінюється відносно повільно порівняно з динамікою температури повітря в промислових теплицях. Температура тепличних ґрунтів впливає на інтенсивність надходження мінеральних елементів і води до кореневої системи рослин, адже кореневе поглинання є активним механізмом, яке потребує метаболічної енергії [2]. Температуру ґрунту можна регулювати швидкістю, кількістю та температурою теплоносія, що надходить до системи.

Світловий режим. У нормативних документах та наукових джерелах [3] обґрунтовано загальні вимоги до інтенсивності та періоду освітлення промислових тепличних комплексів, які полягають у наступному:

– у розсадних відділеннях овочевих теплиць мінімальна сумарна інтенсивність освітлення з обліком природного та штучного освітлення повинна бути не менше 25 Вт/м^2 ФАР (фотосинтетична активна радіація); добова кількість ФАР – не менше 250 Вт·год/ м^2;

– в овочевих теплицях сумарна інтенсивність освітлення повинна бути не менше 80 Вт/м^2 ФАР (для огірків) та 95 Вт/м^2 ФАР (для томатів); добова кількість ФАР для овочевих культур у період плодоношення – не менше 900 Вт·год/м^2;

– під час вирощування культур в умовах штучного освітлення для сіянців і розсади рекомендується приймати опромінення на рівні 80 Вт/м^2; для овочевих культур – від 80 Вт/м^2 до 160 Вт/м^2;

– для огірків рекомендованим є наступний розподіл енергій за спектральним складом: у діапазоні від 380 нм до 490 нм – 20 %, від 490 нм до 590 нм – 40 %, від 590 нм до 700 нм – 40 %; для томатів: у діапазоні довжин хвиль від 380 нм до 490 нм – 20 %, від 490 нм до 590 нм – 15 %, від 590 нм до 700 нм – 65 %.

Газовий склад та швидкість руху повітря в зоні вирощування. Згідно джерел [1] концентрацію CO_2 у зоні вирощування в залежності від світлового режиму слід приймати згідно рекомендацій, які наведено в табл. 1.5.

Таблиця 1.5 – Норми концентрації CO_2 у зоні вирощування теплиць

Сумарна інтенсивність освітлення, Вт/м^2 ФАР	Концентрація вуглекислого газу, %		
	Розсада	*До плодоношення*	*Плодоношення*
Томат			
до 40	від 0,05 до 0,07	від 0,05 до 0,07	від 0,04 до0,05
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
Огірок			
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

Томати. Цей тип культур є одним із найбільш економічно важливих, відносний обсяг їх виробництва у світі становить 28,03 % від загального виробництва овочів згідно статистичних даних FAO.

Рекомендовані параметри мікроклімату під час вирощування томатів є наступними [4]:

– оптимальна температура повітря вдень становить від 19 ºС до 24 ºС та вночі – від 16 ºС до 18 ºС; різниця між температурою вдень та вночі не повинна перевищувати від 6 до 7 ºС;

– оптимальна вологість повітря становить від 65 % до 75 %;

– рекомендована швидкість руху потоків повітря – 0,5 м/с;

– необхідна освітленість – від $0{,}5 \cdot 10^4$ лк до $1{,}5 \cdot 10^4$ лк;

– рекомендована концентрація CO_2 – від 800 ppm до 1000 ppm;

– оптимальна кислотність ґрунту становить від 6 од. до 7 од.;

– оптимальна електропровідність ґрунту – близько 2,5 мСм/см;

– рекомендована температура ґрунту – 20 ºС.

Огірки. Огірки, як і томати, є одним із найбільш економічно вигідних типів культур під час вирощування в тепличних умовах через свою швидкість зростання. Огірки є типовими субтропічними культурами та найкраще зростають в умовах високої температури, вологості, інтенсивності світла й доступності поживних речовин.

Рекомендовані параметри мікроклімату під час вирощування огірків є наступними [4]:

– оптимальна температура повітря: під час посівів – від 25 ºС до 35 ºС (за умови інтенсивного зволоження); перший тиждень після висадки – від 22 ºС до 24 ºС; під час початку плодоношення – від 20 ºС до 22 ºС; різниця між денною та нічною температурами має становити не більше 2 ºС;

– рекомендована температура ґрунту становить від 22 ºС до 23 ºС;

– рекомендована концентрація CO_2 – від 600 ppm до 800 ppm;

– оптимальна кислотність ґрунту становить від 5,5 од. до 6,5 од.;

– оптимальна електропровідність ґрунту – від 2 мСм/см до 2,5 мСм/см.

Перець овочевий. Вирощування перцю в тепличних умовах є економічно привабливою процедурою через порівняно високу швидкість зростання (у середньому від 50 до 60 діб) та значну питому врожайність (до 18 кг/м^2).

Рекомендовані параметри мікроклімату під час вирощування перцю є такими [9]:

– оптимальна температура повітря вдень – від 20 ºС до 25 ºС і вночі – від 16 ºС до 18 ºС;

– рекомендована відносна вологість повітря становить близько 75 %;

– рекомендована концентрація CO_2 – від 800 до 1000 ppm;

– оптимальна кислотність ґрунту становить від 5,5 до 6,5 од.

Салат та інші листяні овочі. На теперішній час ринок салату та інших листяних овочів знаходиться у фазі формування. Проте світова тенденція ринку тепличної продукції розширюється з кожним роком у бік такого типу культур,

що є економічно обґрунтованою тенденцією.

Рекомендовані параметри мікроклімату під час вирощування салату та інших листяних овочів є наступними [4]:

– оптимальна температура повітря вдень – 23 ºС, вночі – 7 ºС;

– рекомендована відносна вологість повітря – від 75 % до 85 %;

– норми добового освітлення – від 12 моль/(м^2·доба) до 14 моль/(м^2·доба).

Загальні світові рекомендації до моніторингу параметрів мікроклімату теплиць. Міжнародною організацією «International Committee for Controlled Environment Guidelines» було розроблено рекомендації щодо комплексного моніторингу параметрів мікроклімату промислових теплиць.

Ці рекомендації описують методику оцінки впливу параметрів мікроклімату на зріст тепличних культур.

Усі параметри узагальнено п'ятьма категоріями: випромінювання, температура, газовий склад, волога та поживні речовини.

Регламентовану інформацію щодо інструментального моніторингу параметрів мікроклімату теплиць зі зазначенням вимог до функціональних, технічних і метрологічних характеристик використовуваних засобів вимірювальної техніки в узагальненому вигляді наведено в табл. 1.6 і 1.7.

Таким чином, з метою забезпечення оптимальних умов вирощування культур у тепличних умовах, актуальні вітчизняні й закордонні нормативні документи регламентують до моніторингу понад десяти параметрів мікроклімату.

Отже, комплексний комп'ютеризований вимірювальний моніторинг стану мікроклімату теплиць (вологісний і температурний режими, інтенсивність і спектральний склад освітлення, мінеральний склад поливного розчину й газовий склад повітря) у режимі реального часу та адаптивний автоматичний контроль технологічних режимів вирощування є обов'язковими процедурами, які мають бути враховані під час проектування сучасних промислових тепличних комплексів задля підвищення обсягів, темпів і якості виробництва овочевої

продукції на захищених ґрунтах.

Таблиця 1.6 – Вимірювані параметри та вимоги до метрологічних характеристик вимірювачів

Параметр	Одиниці вимірювання	Рекомендований засіб вимірювання	Клас точності	Допустима невизначеність
Фотосинтетична активна радіація (ФАР)	мкмоль/(м^2·с)	квантовий сенсор	±1 %	±10 %
Балансна промениста енергія	Вт/м^2	балансомір	±2 %	±5 %
Спектральна промениста енергія	мкмоль/(м^2× ×с·нм)	спектрорадіометр	±1 %	±5 %
Інтенсивність сонячного опромінення	Вт/м^2	піранометр	±1 %	±5 %
Температура повітря	ºС	металеві терморезистори, термопари, термістори	±0,1 %	±0,2 ºС
Температура ґрунту	ºС	металеві терморезистори, термопари, термістори, інфрачервоні сенсори	±0,1 %	±0,2 ºС
Відносна вологість повітря	%	ємнісні сенсори, психрометри	±2 %	±5 %
Відносна вологість ґрунту	%	ємнісні або кондуктометричні сенсори	±2 %	±5 %
Швидкість повітря	м/с	анемометр	±2 %	±5 %
Кислотність поливного розчину	відн. од.	pH-електрод	±0,1 pH	±0,1 pH
Електрична провідність поливного розчину	мСм/см	Кондуктометричний вимірювач	±3 %	±5 %
Розчинений у воді кисень	мг/л	вимірювач концентрації розчиненого кисню з температурною компенсацією	±3 %	±5 %
Концентрація вуглекислого газу в повітрі	ppm	кремнієві сенсори, інфрачервоні оптичні сенсори	±1 %	±3 %

Таблиця 1.7 – Рекомендовані функціональні й технічні вимоги до процедур вимірювального моніторингу параметрів мікроклімату

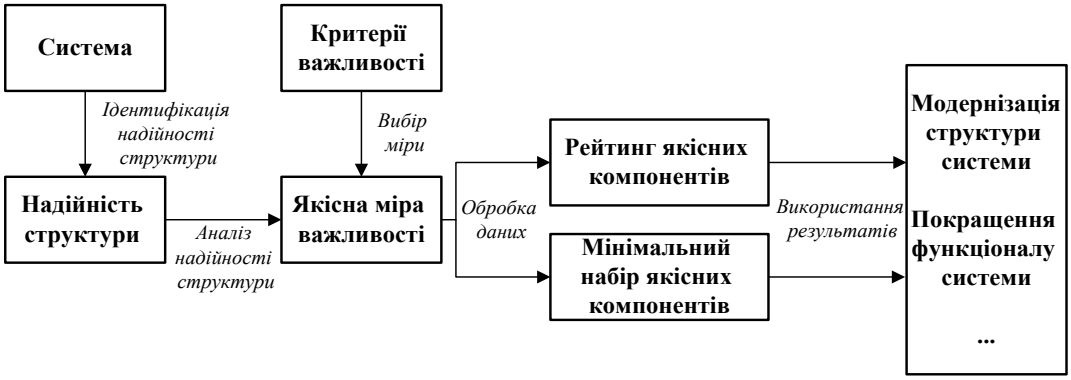
Вимірюваний параметр	Місце вимірювання	Період вимірювання	Реєстрація даних
Температура повітря	у центрі зони вирощування	безперервно	середнє значення та середнє квадратичне відхилення; кількість точок спостережень
Температура ґрунту	у зоні кореневої системи	безперервно	середнє значення та середнє квадратичне відхилення вдень і вночі; кількість точок спостережень
Спектральна промениста енергія	у центрі зони вирощування	безперервно	середнє значення та середнє квадратичне відхилення; кількість точок спостережень
Інтенсивність сонячного опромінення	у центрі зони вирощування та ззовні теплиці	безперервно	середнє значення та середнє квадратичне відхилення; кількість точок спостережень
Період освітлення	–	–	тривалість періоду освітлення з точністю до хвилин
Відносна вологість повітря	у центрі зони вирощування	безперервно	середнє значення та середнє квадратичне відхилення вдень і вночі; кількість точок спостережень
Вологість ґрунту	у зоні кореневої системи	безперервно	середнє значення та середнє квадратичне відхилення вдень і вночі; кількість точок спостережень
Кислотність поливного розчину (ґрунту)	у зоні кореневої системи або в поливному розчині	безперервно	середнє значення та середнє квадратичне відхилення; місце вимірювання; кількість точок спостережень
Концентрація вуглекислого газу в повітрі	у центрі зони вирощування та ззовні теплиці	безперервно	середнє значення та середнє квадратичне відхилення; кількість точок спостережень
Електрична провідність поливного розчину (ґрунту)	у зоні кореневої системи або в поливному розчині	безперервно	середнє значення та середнє квадратичне відхилення; місце вимірювання; кількість точок спостережень
Витрати поливної води	у системі зрошення	безперервно	середнє значення та середнє квадратичне відхилення; частота вмикання системи поливу; період роботи.

1.2. Критерії побудови сучасних інформаційних підсистем комп'ютеризованого моніторингу

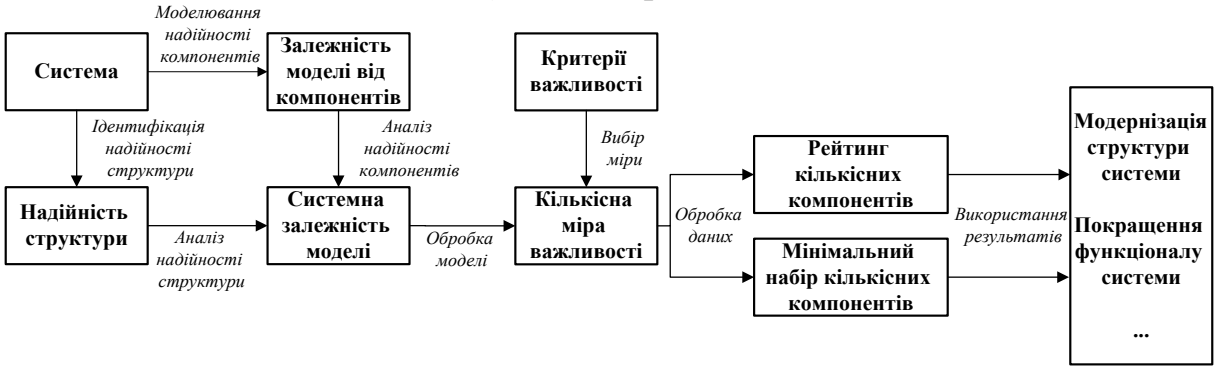
Однією з найбільш важливих проблем, які вирішуються під час створення сучасних інформаційних підсистем моніторингу технологічних процесів, є

науково-обґрунтований вибір технічних, апаратних і програмних засобів, для прецизійних вимірювань і адаптивного моніторингу процедур вирощування культур в умовах захищеного ґрунту. Сучасні досягнення в галузі розробки програмно-технічних комплексів для промислової комп'ютеризації й автоматизації агротехнічних об'єктів надають широкі можливості для створення й впровадження високоефективних систем неруйнівного інтелектуального вимірювального моніторингу [5]. Найголовнішим фактором на сьогодні під час вирішення питання розробки систем залишається забезпечення оптимального співвідношення «ціна/якість». Додатковими факторами, що впливають на обґрунтування вектору дослідження систем є: ергономічність переналаштування, масштабованість, надійність, ширина модульності побудови, швидкість локалізації несправних вузлів і блоків та інше.

Також авторами робіт [6, 7] запропоновано функціональні діаграми процесу обліку важливості параметрів під час інтегральної оцінки всієї технічної системи на якісному й кількісному рівнях, як показано на рис. 1.1, *а* і 1.1, *б*, відповідно.



а) якісний рівень



б) кількісний рівень

Рисунок 1.1 – Функціональні діаграми обліку параметрів підсистеми

На рис. 1.2 наведено структурну схему процесу синтезу структурно-алгоритмічних організацій сучасних інформаційних підсистем моніторингу [8].

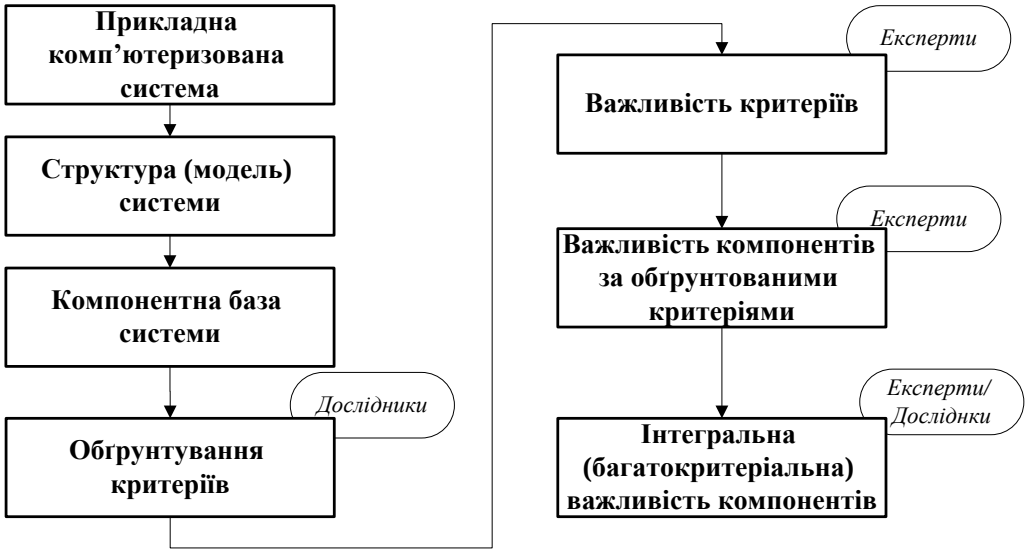


Рисунок 1.2 – Структурна схема процесу синтезу промислових підсистеми

РОЗДІЛ 2. МЕТОДИ ПОБУДОВИ ІНФОРМАЦІЙНИХ ПІДСИСТЕМ МОНІТОРИНГУ СТАНУ МІКРОКЛІМАТУ ТЕПЛИЦЬ

2.1. Аналіз існуючих методів побудови інформаційних підсистем моніторингу стану мікроклімату теплиць

З огляду сучасних тенденцій розробки й впровадження інформаційних підсистем моніторингу стану мікроклімату під час протікання технологічних процесів вирощування культур у тепличних умовах встановлено, що існуючі на сьогоднішній день методи та засоби комп'ютеризованого моніторингу й вимірювального контролю частково або повністю не задовольняють вимогам комплексності та системності агрегації, обробки, інтерпретації та екстраполяції вимірювальної інформації, які задекларовано у вітчизняному та закордонних нормативних документах.

Проведений аналіз існуючих інформаційних підсистем моніторингу стану мікроклімату дозволив встановити факт необхідності розробки й дослідження узагальнених моделей, які описують комплексний вплив характеристик мікроклімату на ефективність вирощування культур у тепличних умовах із можливістю прогнозування вимірювальної інформації.

Отже, одним із пріоритетних завдань розробки інформаційних підсистем моніторингу стану мікроклімату є аналіз існуючих апаратних і програмних компонент побудови подібних систем, а також математичних моделей процесів і пристроїв вимірювання фізичних параметрів під час тепличного вирощування.

Технології моніторингу параметрів освітлення. У наукових джерелах [10-12] встановлено, що інформація про рівень освітленості з урахуванням фізіологічно значущих зон є початковою для завдання коригувальних впливів керування технологічними режимами опалення, зволоження, вентиляції й підживлення рослин вуглекислим газом. На підставі аналізу результатів експериментальних і теоретичних досліджень в області світлокультури тепличних рослин [13-15] встановлено, що алгоритми функціонування систем

доосвітлення тепличних культур повинні бути адаптивними до типів і періодів зростання культур.

Основні підходи до розробки й проектування сучасних систем локального і віддаленого вимірювального моніторингу параметрів сільськогосподарських комплексів із використанням сучасних сенсорних і мікропроцесорних технологій представлені в роботах [16, 17-19]. На підставі аналізу та логічного узагальнення існуючих результатів досліджень щодо структурно-алгоритмічної організації подібних систем встановлено, що їх невід'ємним компонентом є підсистема моніторингу технологічного режиму штучного доосвітлення культур.

У джерелах [20, 21] доведено ефективність протікання фотосинтезу в залежності від спектрального складу джерел світла, як показано на рис. 2.1.

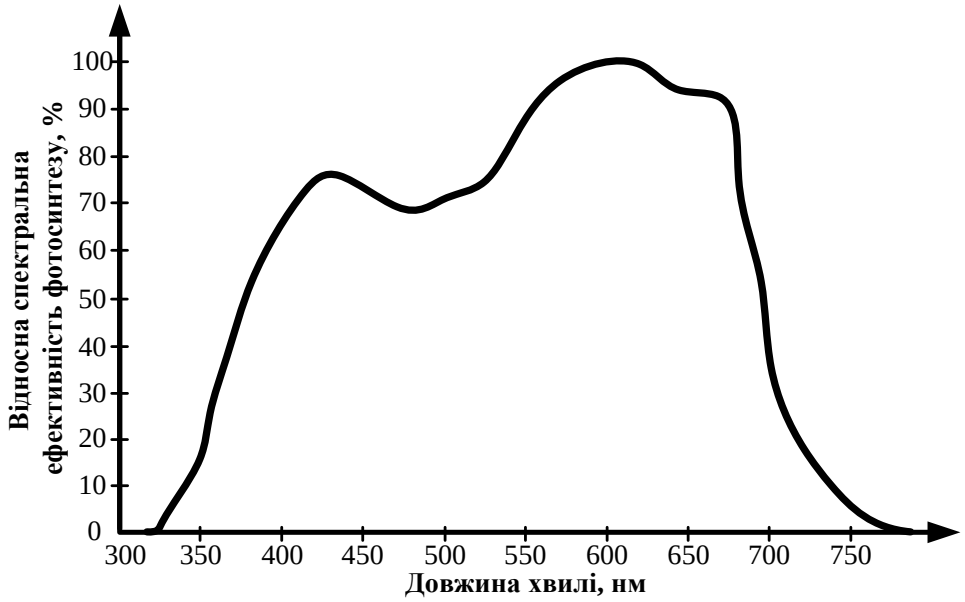


Рисунок 2.1 – Відносна спектральна ефективність фотосинтезу

Основними підходами до керування інтенсивністю та спектральним складом освітлення в тепличних умовах є регулювання густини висадки культур, використання сіток, що екранують і затінюють, а також джерел штучного доосвітлення. Найбільш поширеними джерелами штучного доосвітлення, які використовуються в сучасних тепличних комплексах є: лампи розжарювання, галогенні лампи, газорозрядні лампи і світлодіоди. Серед них світлодіоди набули

значної популярності в науково-дослідницьких роботах і практичних рішеннях завдяки своїм перевагам, таким як: економічна ефективність, компактний дизайн, довговічність, якість світла, можливість комбінування спектральних складових і низьке тепловиділення.

Технології моніторингу температурного режиму. Однією з найбільших переваг тепличного вирощування культур є можливість цілорічного забезпечення оптимальних для зростання температур. Проте, забезпечення оптимальних температур є науко- і трудомістким процесом, який потребує значних працечасових витрат. Процедура автоматичного вимірювального контролю температури в теплицях засобами опалення, затінення й вентиляції потребує безперервного оперативного й прецизійного моніторингу температури фізичних середовищ теплиць (поливний розчин, ґрунт, повітря).

У свою чергу, відповідні сенсори температури потребують захисту від прямої дії сонячних променів, потоків повітря, руйнуючих факторів, які містяться в домішках поливного розчину та солях субстрату. Таким чином, одними із найбільш інформативних і одночасно регламентованими до обов'язкового вимірювального моніторингу параметрів мікроклімату теплиць є температура ґрунту, повітря і поливного розчину. Цей факт обумовлено тим, що всі рослини можуть зростати тільки в певних температурних умовах, адже в кожній зоні ростуть рослини, пристосовані до коливань температури в певних межах. Тому, для кожного виду культур, які вирощуються в тепличних умовах, необхідною умовою є відтворення оптимальних температур із обліком їх періодів вегетації.

У свою чергу, температура впливає на процеси фотосинтезу, дихання і транспірації, на ріст і розвиток рослин, а також на їх формоутворення і, як наслідок, на обсяги й якість вирощеної продукції. Отже, розробка і впровадження інформаційних підсистем моніторингу температури повітря, ґрунту і поливного розчину в тепличних умовах є обов'язковою умовою, що підтверджується широким спектром досліджень [22-25].

У роботах [26-28] представлені основні результати досліджень із розробки систем оптимального контролю мікроклімату теплиць на базі технології Fuzzy Logic. Із аналізу даних робіт встановлено, що вимірювальні канали температури повітря зони вирощування, температури ґрунту в кореневмісному шарі та температури поливної води є обов'язковими структурними елементами систем забезпечення оптимального мікроклімату.

У [29] і нормативних документах обґрунтовано основні вимоги до локацій виконання вимірювань, періодичності й точності вимірювального моніторингу температури фізичних середовищ у теплицях: сумарна абсолютна невизначеність вимірювання температур повітря, субстрату і поливної води не повинна перевищувати ±0,2 °С у робочому діапазоні від 10 °С до 40 °С.

Також під час аналізу вищевказаних літературних джерел встановлено факт необхідності розробки систем моніторингу та контролю температурного режиму вирощування тепличних культур на базі сучасних серійних сенсорів температури, які функціонально сумісні з широкодоступними мікроконтролерами.

У результаті проведеного аналізу були встановлені основні типи серійних бюджетних сенсорів, які можуть бути застосовані для неруйнівного комп'ютеризованого моніторингу температур фізичних середовищ у тепличних умовах. У роботах [30-33] досліджено основні принципи побудови бездротових сенсорних мереж вимірювального моніторингу температури для тепличних умов з використанням цифрового сенсора DS18B20. Під час розробки подібних систем в якості чутливого елемента температури автори пропонують використовувати сенсор SHT11. Аналогічні дослідження з розробки і моделювання систем моніторингу температури фізичних середовищ представлені з використанням сенсорів SHT21, BMP180, BME280 і DHT22.

Технології моніторингу режимів зволоження. Вирішення науково-практичних задач розробки та дослідження методів і засобів вимірювального моніторингу режимів зрошення тепличних ґрунтів і зволоження повітря зони

вирощування є обов'язковою умовою задля обґрунтування наукових засад щодо впровадження прогресивних технологій моніторингу та адаптивного контролю інтегрального стану мікроклімату промислових теплиць з метою підвищення показників темпів, обсягів та якості виробництва тепличної овочевої продукції.

Безперервний неруйнівний вимірювальний моніторинг вологості фізичних середовищ теплиць потребує особливої уваги, тому що надмірний рівень вологи може викликати появу захворювань та призводити до зниження транспірації, а недостатня вологість може викликати гідравлічний стрес і знижувати інтенсивність фотосинтезу через зменшення асиміляції вуглекислого газу [34].

Процес дослідження вимірювачів вологості для тепличних умов пов'язаний з двома основними проблемами:

– температура та вологість у теплицях знаходяться у зворотній пропорційній залежності;

– більшість сучасних автоматичних комплексів контролю й керування параметрами мікроклімату теплиць використовують одні й ті самі привідні механізми для регулювання температури та вологості.

Задля підтримання оптимального рівня вологості в певному діапазоні значення температури повинно встановлюватись на основі поточного значення відносної вологості. Отже, регулятор вологості має працювати в режимі генератора заданих значень зі здатністю виробляти сигнал, що керує температурою з достатньою чутливістю у відповідному робочому діапазоні.

У [35] встановлено експериментальні залежності між оптимальними значеннями температури, вологості повітря та інтенсивності освітлення для різних типів тепличних культур, як показано в табл. 2.1.

Таблиця 2.1 – Оптимальні параметри мікроклімату теплиць

Типи рослин	Температура повітря, ºС	Вологість повітря, %	Інтенсивність освітлення (ФАР), мкмоль/(м^2·с)
Томат	від 23 до 27 (вдень) від 13 до 16 (вночі)	від 50 до 60	400
Огірок	від 25 до 30	від 80 до 90	400
Баклажан	від 25 до 28 (вдень) від 14 до 16 (вночі)	від 65 до 75	505
Перець	від 22 до 30 (вдень) від 14 до 16 (вночі)	від 60 до 65	505
Салат	від 24 до 28 (вдень) від 13 до 16 (вночі)	від 65 до 80	від 260 до 290
Полуниця	від 20 до 26 (вдень) від 13 до 16 (вночі)	від 50 до 65	від 200 до 400

Загальним результатом аналізу відомих технологій вимірювального моніторингу режимів зрошення й зволоження фізичних середовищ теплиць є встановлення необхідності розробки й дослідження комп'ютеризованих вимірювальних підсистем вологості ґрунту та повітря зони вирощування з обліком факторів температури, інтенсивності й спектрального складу освітлення, а також типів і періодів вегетації культур у онлайн режимі.

Технології моніторингу концентрації вуглекислого газу. Задля сприятливого протікання процесу фотосинтезу окрім вимірювань температури, інтенсивності освітлення й вологості обов'язковим є вимірювальний моніторинг концентрації вуглекислого газу, що значно впливає на зростання культур.

Сучасні засоби контролю концентрації CO_2 повинні виконувати функції безперервного моніторингу й генерування сигналів керування поточним рівнем CO_2 у зоні вирощування теплиць з обліком впливних факторів і процесів. На теперішній час розроблено і впроваджено велику кількість портативних і стаціонарних вимірювачів концентрації CO_2 із комп'ютерним керуванням. Так само, як і сенсори інтенсивності опромінення, чутливі елементи вимірювачів CO_2 мають розміщуватись на рівні вирощуваних культур. Обов'язковою базовою

функцією комп'ютеризованих засобів вимірювального моніторингу концентрації вуглекислого газу є генерування сигналів, що керують виконавчими механізмами джерел дозування двоокису вуглецю. Крім того, алгоритми функціонування вимірювачів концентрації CO_2 мають бути адаптованими до поточних значень температури, вологості та інтенсивності освітлення зони вирощування культур, а також типів і періодів вегетації тепличних рослин.

В [34] висвітлено основні методи вимірювання концентрації вуглецю в промислових теплицях, а також вимоги до відповідних засобів моніторингу. У [35] отримано відносну характеристику інтенсивності зросту тепличних культур у залежності від концентрації CO_2 у зоні вирощування, як показано на рис. 2.2.

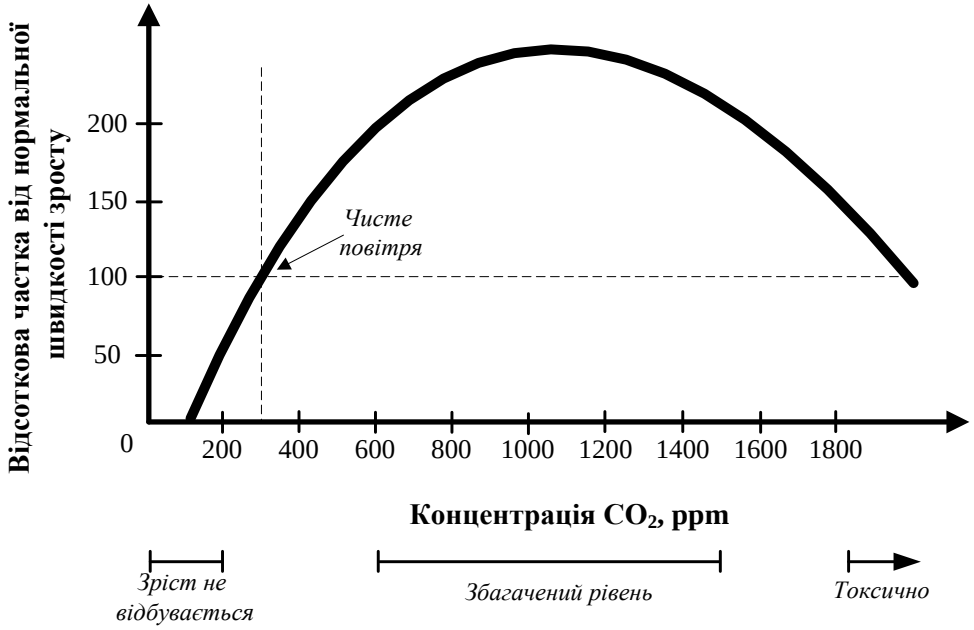


Рисунок 2.2 – Відносна характеристика інтенсивності зросту

Одним із основних параметрів мікроклімату теплиць, від якого залежать показники темпів і обсягів вирощування культур, є концентрація двоокису вуглецю.

Заявлені фірмами-виробниками технологічні характеристики існуючих систем вимірювального моніторингу концентрації вуглекислого газу в умовах промислових теплиць не дозволяють адекватно оцінити можливість адаптації таких систем для різних типів культур і конструкцій теплиць. Цей недолік

обумовлений відсутністю у відкритому доступі опису принципів функціонування промислових кліматичних контролерів для теплиць. Проведений аналіз існуючих програмних продуктів типу для розрахунку необхідної для підкормки тепличних рослин концентрації CO_2 дозволив встановити їх істотний недолік, який полягає у відсутності опису алгоритмів їх функціонування, що ускладнює об'єктивний аналіз отриманих результатів. Це, в свою чергу, обмежує можливість застосування такого типу програмного забезпечення для адаптивного розрахунку оптимальної концентрації двоокису вуглецю з обліком геометричних параметрів теплиць, а також типів і періодів вегетації культур.

Таким чином, виникає необхідність вирішення науково-прикладної задачі розробки структурно-алгоритмічної організації засобів моніторингу під час реалізації процедури дозування вуглекислого газу в умовах вирощування культур на закритому ґрунті з урахуванням геометричних характеристик теплиць із задовільними функціональними й метрологічними характеристиками.

Обов'язковою процедурою автоматизації технологічних процесів вирощування інтродукованої флори є отримання вимірювальної інформації щодо основних фізико-хімічних параметрів із обчисленням на їх підставі інтегрального стану мікроклімату теплиць на базі сучасних інструментальних комп'ютеризованих засобів. Одними із найбільш впливових на якість вирощування та одночасно регламентованими до обов'язкового вимірювального моніторингу параметрів мікроклімату теплиць є електропровідність, кислотність і окислювально-відновлювальний потенціал (ОВП) поливного розчину [21]. Це пов'язано з тим, що одне з основоположних значень задля підвищення врожайності має оптимальне внесення поживних речовин до поливного розчину, яке неможливе без отримання вимірювальної інформації щодо вищевказаних фізико-хімічних параметрів.

У [21] обґрунтовано необхідність безперервних інструментальних вимірювань кислотності й електропровідності поливного розчину з агрегацією

результатів спостережень щодо середнього значення, середнього квадратичного відхилення результатів спостережень і результату вимірювання, місця виконання вимірювань та кількості точок спостережень.

У [33, 35] представлені результати досліджень із обґрунтування основ побудови інформаційних підсистем моніторингу й оцінки показників якості поливної води в тепличних умовах. У [34] представлені основні положення з побудови систем моніторингу параметрів якості рідких фізичних середовищ теплиць із використанням бюджетних мікропроцесорних платформ.

Дослідження [34] присвячено ґрунтовному аналізу впливу якості поливного розчину, яка кількісно може бути оцінена шляхом вимірювального моніторингу електропровідності та кислотності, на ефективність вирощування культур у теплицях.

У результаті аналізу вищевказаних наукових джерел встановлено, що на сьогоднішній день недостатньо опрацьовані питання функціонального і метрологічного забезпечення комп'ютеризованих вимірювачів якості поливного розчину в складі систем моніторингу стану мікроклімату теплиць.

2.2. Комп'ютерні технології систем моніторингу стану мікроклімату теплиць

Під час аналізу відомих комп'ютерно-орієнтованих технологій встановлено сукупність тих, які можуть бути використанні в якості базових для підвищення рівня інтелектуалізації технологічних процесів вирощування культур у теплицях: штучні нейронні мережі; еволюційні обчислення та генетичні алгоритми; нечітка логіка; еволюційна робототехніка; інтернет речей; бездротові сенсорні мережі.

Сформульовані в загальному вигляді вимоги до структурної організації та функціонального забезпечення систем моніторингу стану мікроклімату теплиць на підставі збору і аналізу вимірювальної інформації щодо розподілених фізико-хімічних параметрів у вигляді блок-схем наведено на рис. 2.3 і 2.4.

Також варто зазначити, що під час розробки та впровадження

інформаційних підсистем моніторингу параметрів мікроклімату під час протікання технологічних процесів вирощування культур у тепличних умовах, використовуються сучасні інфокомунікаційні технології, основними з яких є: Wireless ZigBee 2.4 GHz, Wireless Wi-Fi, Wired Modbus, Wireless Ethernet, GPRS та Wireless LORA-CBF.

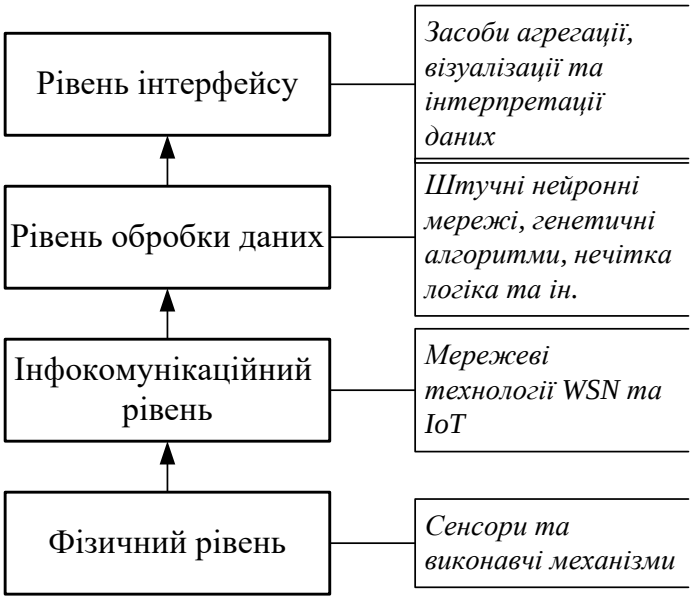


Рисунок 2.3 – Загальна структура сучасних КС



Рисунок 2.4 – Блок-схема трансформації вимірювальної інформації

2.3. Моніторинг температурного режиму вирощування тепличних культур

Інструментальний моніторинг температури є динамічним процесом, характеристики якого в основному обумовлено обміном енергією між фізичними середовищами внутрішньої зони вирощування теплиць та довколишнім середовищем. У такому випадку математичне моделювання термодинамічних процесів, що протікають у теплиці, полягає у встановленні та розв'язанні відповідних рівнянь математичної фізики. Сучасний інженерний дизайн теплиць дозволяє ввести припущення під час побудови математичної моделі термодинамічних процесів, що теплиця є об'єктом з рівномірним розподілом температури в зоні вирощування. Отже, базовим рівнянням під час побудови математичної моделі процесу моніторингу температури є:

$$\frac{dT_{air\ in}(t)}{dt} = \frac{Q_{total}(t)}{V_g \cdot \rho_{air} \cdot C_{\rho_{air}}}, \tag{2.1}$$

де $T_{air\ in}$ – температура зони вирощування теплиці, ºС; Q_{total} – загальна теплова енергія в зоні вирощування, Вт; t – час, год.; V_g – об'єм зони вирощування, м^3; ρ_{air} – густина повітря, кг/м^3; $C_{\rho_{air}}$ – питома теплоємність повітря, Дж/(кг·ºС).

На динаміку температури в теплицях чинять вплив різні процеси тепло- і масопереносу. Отже, для розробки відносно точної та адекватної моделі, що описує розподіл тепла в зоні вирощування теплиць, важливо детально дослідити механізми цих процесів. Таким чином, в основу розроблюваної математичної моделі покладено рівняння балансу маси та енергії всередині теплиці:

$$Q_{total} = Q_{gain} - Q_{loss}, \tag{2.2}$$

де Q_{total} – загальна теплова енергія, Вт; Q_{gain} – кількість енергії, що надходить до теплиці, Вт; Q_{loss} – кількість енергії, що споживається, Вт.

На кількість теплової енергії, що надходить до теплиці в значній мірі впливають наступні фізичні процеси та явища: енергія від сонячної радіації; енергія, що надходить від систем опалення; теплова складова енергії від дії штучних систем доосвітлення. Таким чином, у загальному вигляді кількість

енергії, що надходить до теплиці, може бути обчислена за формулою:

$$Q_{gain} = Q_s + Q_h + Q_l \,, \tag{2.3}$$

де Q_s – корисна сонячна енергія, що надходить до теплиці, Вт; Q_h –теплова енергія, що надходить від систем опалення, Вт; Q_l – теплова складова енергії від дії штучних систем доосвітлення, Вт.

Втрати теплової енергії в теплиці в значній мірі обумовлено наступними процесами та явищами: втрати тепла внаслідок теплопровідності; втрати тепла через поглинаючу здатність ґрунту; тепловіддача за рахунок вентиляції та інфільтрації; теплопередача шляхом конденсації. Отже, у загальному вигляді кількість теплової енергії, що втрачається у теплиці, може бути обчислена наступним чином:

$$Q_{loss} = Q_k + Q_g + Q_v + Q_i + Q_c \,, \tag{2.4}$$

де Q_k – втрати тепла через теплопровідність, Вт; Q_g – втрати тепла через поглинаючу здатність ґрунту, Вт; Q_v – тепловіддача через вентиляцію, Вт; Q_i – тепловіддача через інфільтрацію, Вт; Q_c – теплопередача через конденсацію, Вт. На підставі вищесказаного було запропоновано узагальнену структурну схему моніторингу температури в зоні вирощування теплиць, що описує впливи вищезаявлених фізичних явищ на процеси теплообміну (рис. 2.5).

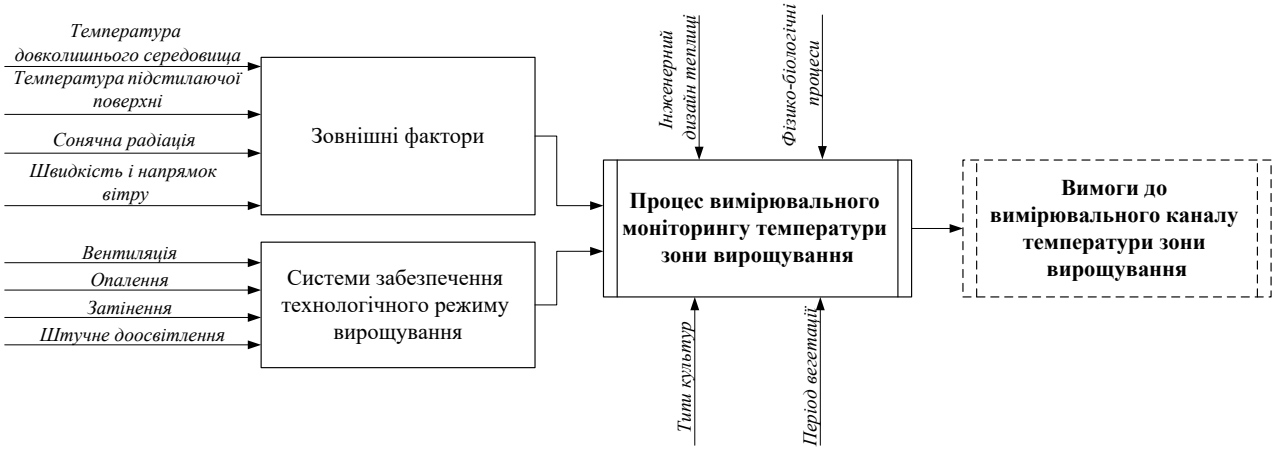


Рисунок 2.5 – Структурна схема моніторингу температури зони вирощування

У відповідності до принципу енергетичного балансу можна встановити енергетичну модель кожного динамічного процесу. Одним із найбільш визначальних факторів, що обумовлює надходження теплової енергії до теплиці, є сонячна радіація. Теплова енергія, що поступає до теплиці від сонця, може бути оцінена за наступним співвідношенням:

$$Q_s = A_g \cdot \gamma \cdot K_\tau \cdot I_{total}\,, \tag{2.5}$$

де A_g – площа поверхні (даху та бокових стінок) теплиці, м^2; γ – константа частки сонячної радіації, що надходить до теплиці та обумовлює збільшення температури, відн. од.; K_τ – пропускна здатність поверхні теплиці, відн. од.; I_{total} – сонячна енергія, що падає на поверхню теплиці, Вт/м^2.

На теперішній час існує декілька теоретичних моделей, які описують динаміку сонячної радіації. В якості базової моделі під час знаходження оціночного значення загальної сонячної енергії, що падає на поверхню теплиці, було обрано наступну узагальнену емпіричну залежність:

$$I_{total} = k_{decr} \cdot I_{SC} \cdot \left(1 + 0{,}033 \cdot \cos\left(360 \cdot \frac{(n-3)}{365}\right)\right), \tag{2.6}$$

де I_{total} – загальнодобове сонячне випромінювання, Вт/м^2; k_{decr} – коефіцієнт послаблення сонячної радіації, що змінюється в діапазоні від 0,47 до 0,85, відн. од.; I_{sc} – сонячна постійна, рівна 1367 Вт/м^2; n – наскрізний номер доби.

Отримані результати моделювання річного розподілу сонячної радіації, які отримано на підставі формули (2.6), наведено на рис. 2.6. На підставі аналізу отриманих даних моделювання було встановлено необхідність уточнення моделі розподілу сонячної радіації з обліком її сезонної та добової динаміки для помірно-континентального клімату. Для весняно-літнього періоду середнє значення довжини світлового дня прийнято рівним 13 год. (з 6:00 до 19:00 GMT+3), а для осінньо-зимового – 8 год. (з 8:00 до 16:00 GMT+3).

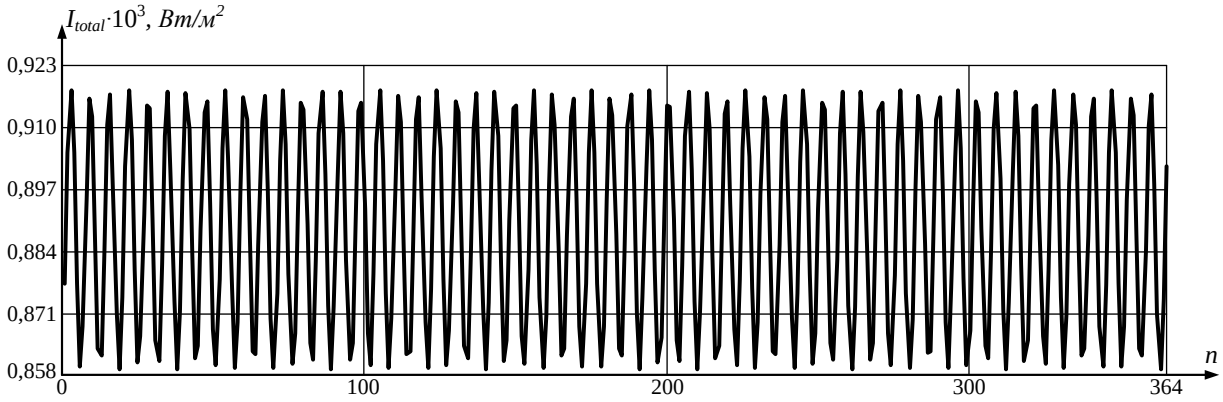


Рисунок 2.6 – Річна динаміка сонячної радіації

На підставі цього аналітичний вираз для опису добової динаміки сонячної радіації з обліком сезонності має наступний вигляд:

– для весняно-літнього періоду:

$$\begin{cases} I_{total} = \left| k_{decr} \left(I_{SC} \cdot \sin\left(\omega t - \varphi\right) + I_{SC} \cdot \sin\left(\omega\right) \right) \right|, \text{ якщо } 6n \le t \le 19n \\ I_{total} = 0, \text{ у іншому випадку} \end{cases}; \quad (2.7)$$

– для осінньо-зимового періоду:

$$\begin{cases} I_{total} = \left| k_{decr} \left(I_{SC} \cdot \sin\left(\omega t - \varphi\right) + I_{SC} \cdot \sin\left(\omega\right) \right) \right|, \text{ якщо } 8n \le t \le 16n \\ I_{total} = 0, \text{ у іншому випадку} \end{cases}, \quad (2.8)$$

де ω – циклічна частота зміни сонячної радіації, яка визначається як 2π/24, рад.; φ – аргумент синусоїдальної варіації сонячної радіації (для весняно-літнього періоду – 13 год., для осінньо-зимового – 8 год.); n – наскрізний номер доби.

Таким чином, отриманий за формулами (2.7) і (2.8) графік залежності добової динаміки сонячної радіації, наведено на рис. 2.3. Під час оцінки значення корисної сонячної енергії, що надходить до теплиці, прийнято чисельні значення у відповідності до табл. 2.2. Результати моделювання у нормованому до максимального значення енергії (для теплиць стандартних типорозмірів: 1500 м^2 дорівнює 378,5 кВт і 3000 м^2 – 757 кВт) наведено на рис. 2.8.

Таблиця 2.2 – Прийняті значення моделювання корисної сонячної енергії

Параметр	Прийняте значення	Одиниці вимірювання
Площа поверхні (A_g)	1500; 3000	м^2
Константа частки сонячної радіації (γ)	0,5	відн. од.
Пропускна здатність поверхні теплиці (K_τ)	0,7	відн. од.
Сонячна радіація (I_{total})	див. рис. 2.3	Вт/м^2
Коефіцієнт послаблення сонячної радіації (k_{decr})	0,65	відн. од.

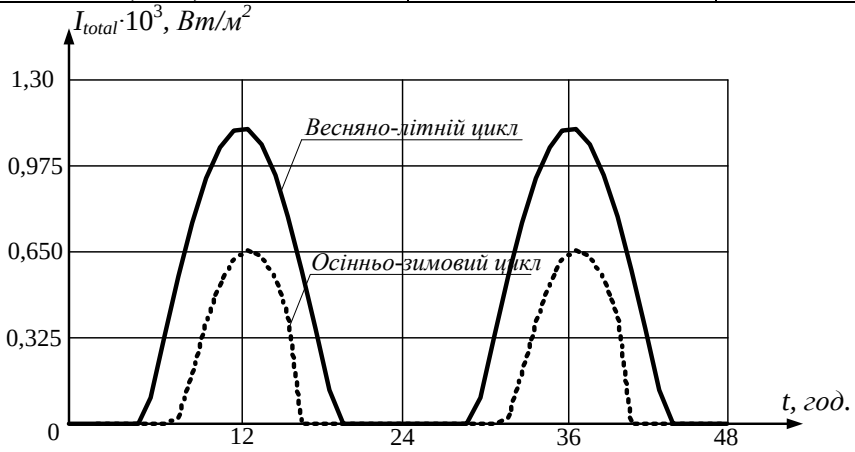


Рисунок 2.7 – Оціночне значення добового розподілу сонячної радіації

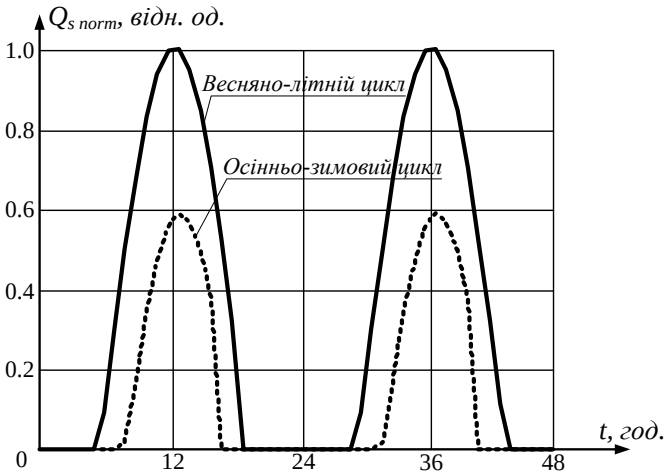


Рисунок 2.8 – Нормована характеристика розподілу корисної сонячної енергії

Отримані результати моделювання, які наведено на рис. 2.4, довели необхідність обліку сезонної та добової динаміки сонячної радіації під час оцінки

теплової енергії, що надходить до зони вирощування теплиць від сонця.

Показник тепловіддачі від стаціонарної системи опалення до зони вирощування в залежності від конструктивних характеристик може бути розрахований за формулою:

$$Q_h = m_{h.c.} \cdot c_{h.c.} \cdot \left(T_{direct} - T_{back}\right), \quad (2.9)$$

де $m_{h.c.}$ – витрата теплоносія, кг/с; $c_{h.c.}$ – питома теплоємність теплоносія, Дж/(кг·ºС); T_{direct} – температура подачі теплоносія, ºС; T_{back} – температура теплоносія, що відводиться з системи опалення, ºС.

Під час оцінки значення теплової енергії, що надходить до теплиці від стаціонарних систем опалення, прийнято чисельні значення параметрів, що входять до формули (2.9), у відповідності до табл. 2.3.

Таким чином, оціночне значення теплової енергії, що надходить до зони вирощування теплиць від стаціонарних систем теплопостачання, яке обчислене за формулою (2.9), дорівнює 420 кВт.

Таблиця 2.3 – Прийняті значення моделювання теплової енергії від систем опалення теплиць

Параметр	Прийняте значення	Одиниці вимірювання
Витрата теплоносія ($m_{h.c.}$)	10	кг/с
Питома теплоємність теплоносія ($c_{h.c.}$)	4200	Дж/(кг·ºС)
Допустима різниця температур прямої та зворотної гілок системи теплопостачання ($T_{direct} - T_{back}$)	10	ºС

На підставі розробленої математичної моделі процесу вимірювального моніторингу температури повітря в зоні вирощування теплиць було уточнено функціональну схему процедур отримання й аналізу інформації щодо температурного режиму вирощування в режимі реального часу, (рис. 2.9).

На рис. 2.9 введено наступні позначення: T_{water} – температура поливного розчину; T_{soil} – температура ґрунту; $T_{air\ in}$ – температура повітря в зоні

вирощування; $T_{air\ out}$ – температура повітря навколишнього середовища; $W_{air\ out}$ – вологість повітря навколишнього середовища; $v_{air\ out}$ – швидкість руху потоків повітря навколишнього середовища; $D_{air\ out}$ – напрямок руху потоків повітря навколишнього середовища; I_{total} – загальнодобове сонячне випромінювання; $m_{h.c.}$ – витрата теплоносія; T_{direct} – температура подачі теплоносія; T_{back} – температура теплоносія, що відводиться з системи опалення; $P_{el\ soil}$ – споживана електрична потужність системою обігріву ґрунту; r_v – відсоток відкриття механізмів системи вентиляції; k_{air} – кратність обміну повітрям; α_{open} – кут відкриття механізмів зашторювання системи затінення; $P_{el\ water}$ – споживана електрична потужність системою підігріву поливного розчину.

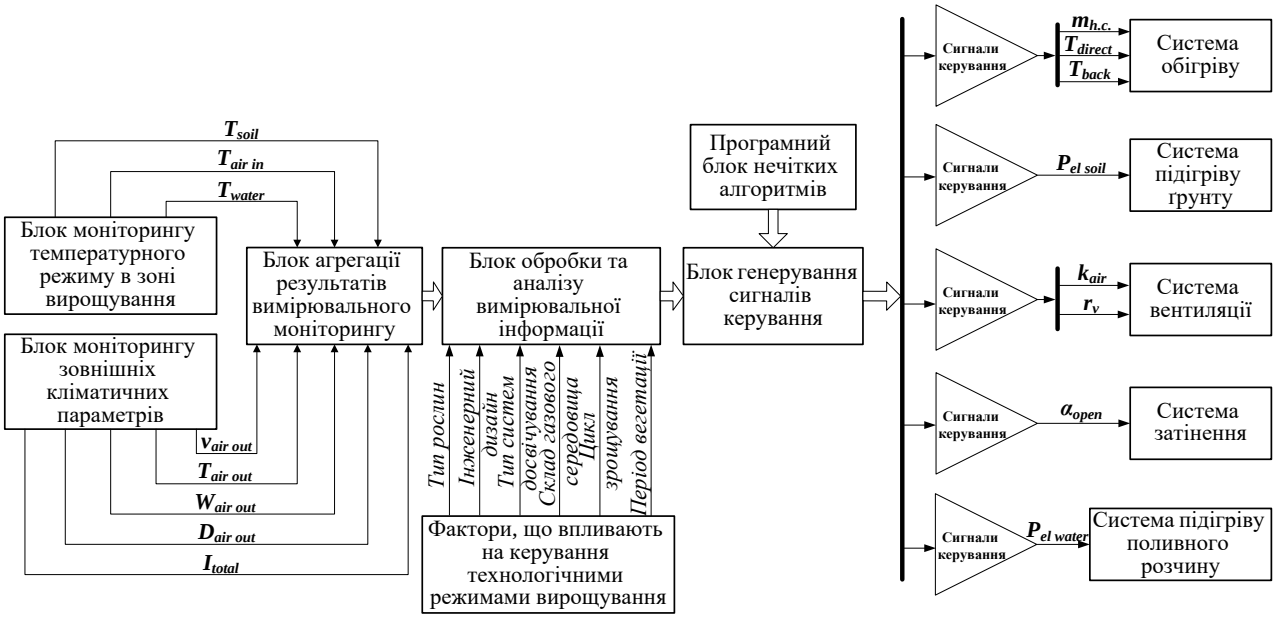


Рисунок 2.9 – Уточнена функціональна схема процедури комп'ютеризованого моніторингу параметрів температурного режиму вирощування

Таким чином, запропонована функціональна схема (рис. 2.19), дозволяє реалізувати функцію адаптивного до типів і періодів вегетації культур автоматичного керування технологічними режимами вирощування з обліком факторів сезонності та інженерного дизайну теплиць за результатами неруйнівного комп'ютеризованого моніторингу основних характеристик внутрішнього мікроклімату теплиць і зовнішніх атмосферних параметрів у режимі реального часу.

РОЗДІЛ 3. РОЗРОБКА ІНФОРМАЦІЙНОЇ ПІДСИСТЕМИ МОНІТОРИНГУ СТАНУ МІКРОКЛІМАТУ ТЕПЛИЦЬ

3.1. Математична модель моніторингу технологічного режиму зволоження повітря зони вирощування теплиць

Комп'ютеризований моніторинг вологості повітря зони вирощування аналогічно з температурними вимірюваннями є динамічним процесом, параметри якого обумовлено явищами масопереносу між внутрішнім об'ємом теплиці та довколишнім середовищем, а також фізико-біологічними процесами зростання культур. На підставі вищесказаного було запропоновано узагальнену структурну схему процесу моніторингу, що описує впливи параметрів на процеси масообміну вологою, яку наведена на рис. 3.1.

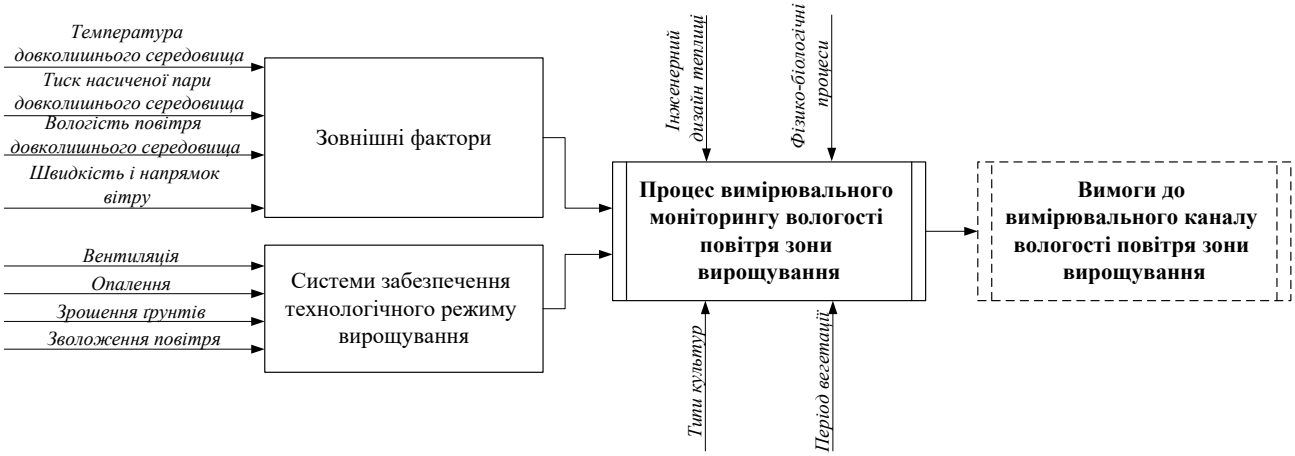


Рисунок 3.1 – Структурна схема моніторингу вологості повітря теплиці

Таким чином, з обліком актуальних вимог до технологічних режимів вирощування та сучасного інженерного дизайну тепличних комплексів базовим рівнянням під час побудови математичної моделі процесу моніторингу вологості повітря зони вирощування теплиць є:

$$\frac{dW_{air\ in}(t)}{dt} = \frac{L_{air\ in}}{\rho_{air} V_g}\left(C_e\left(P_{air\ out}(t) - P_{air\ in}(t)\right) - \left(W_{air\ in}(t) - W_{air\ out}(t)\right)\right) + Z_{total\ hum}(t), \quad (3.1)$$

де $W_{air\ in}$ – відносна вологість повітря зони вирощування, %; $W_{air\ out}$ – відносна вологість повітря навколишнього середовища, %; t – час, с; V_g – об'єм зони

вирощування теплиці, м^3; ρ_{air} – густина повітря, кг/м^3; $L_{air\ in}$ – різниця між витратою свіжого повітря та витратою повітря, що відходить із теплиці, м^3/с; C_e – коефіцієнт перенесення водяної пари в повітрі, кг/(м^3·Па); $P_{air\ out}$ – тиск насиченої пари довколишнього середовища, Па; $P_{air\ in}$ – тиск насиченої пари зони вирощування, що є функцією температури повітря, Па; $Z_{total\ hum}$ – різниця між швидкістю подачі та відведення вологи зі зони вирощування, %/с.

Під час моделювання процесу неруйнівного комп'ютеризованого онлайн моніторингу вологості повітря зони вирощування теплиць прийнято чисельні значення технологічних і конструктивних параметрів у відповідності до табл. 3.1.

Таблиця 3.1 – Технологічні параметри під час моделювання динаміки вологи повітря зони вирощування теплиці

Параметр	Прийняте значення	Одиниці вимірювання
Коефіцієнт переносу водяної пари (C_e)	$2{,}8\cdot10^{-8}$	кг/(м^3·Па)
Густина повітря (ρ_{air})	1,292	кг/м^3
Об'єм теплиці ($V_q=A_q\cdot h_q/4$)	1875; 3750	м^3
Швидкість руху потоків повітря (v_{air})	1	м/с

За аналогією з моделюванням температурного режиму вирощування під час побудови математичної моделі динаміки вологи в зоні вирощування в якості базових культур було обрано томат і огірок з наступними характерними періодами вегетації: до і під час плодоношення в осінньо-зимовий та весняно-літній цикли вирощування. Середнє значення вологості повітря довколишнього середовища встановлено за даними Українського гідрометеорологічного центру: для осінньо-зимового циклу – 81 %, для весняно-літнього 65 %.

На підставі порівняльного аналізу середніх значень вологості повітря довколишнього середовища та регламентованих вимог до вологості повітря зони вирощування встановлено загальні вимоги до продуктивності систем зволоження повітря теплиць, а саме:

– додатковий рівень зволоження (+) / відведення вологи (–) для огірків у

осінньо-зимовий цикл вирощування до плодоношення –6 %, під час плодоношення +9 %; у весняно-літній цикл до плодоношення +10 %, під час плодоношення +15 %;

– додатковий рівень зволоження (+) / відведення вологи (–) для томатів у осінньо-зимовий цикл вирощування до плодоношення –21 %, під час плодоношення –16 %; у весняно-літній цикл до плодоношення –5 %, під час плодоношення +5 %.

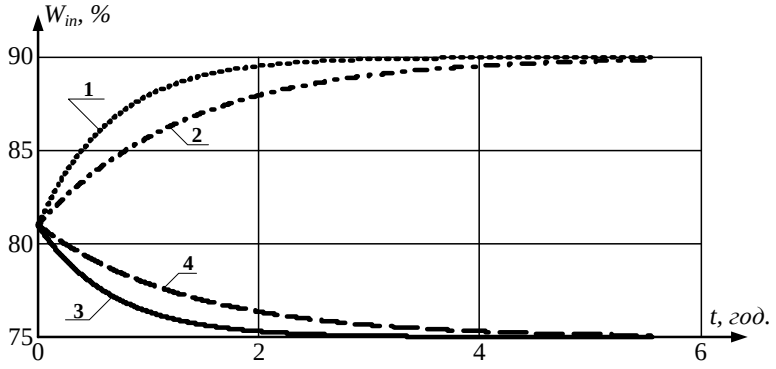
Отримані результати моделювання динаміки вологи у повітрі зони вирощування теплиць на базі диференційного рівняння (3.18) і прийнятих чисельних параметрів (табл. 3.8) наведено на рис. 3.2 і 3.3.

На підставі кількісного та якісного аналізу отриманих результатів із побудови та дослідження математичної моделі процесу вимірювального моніторингу вологості повітря зони вирощування встановлено наступне:

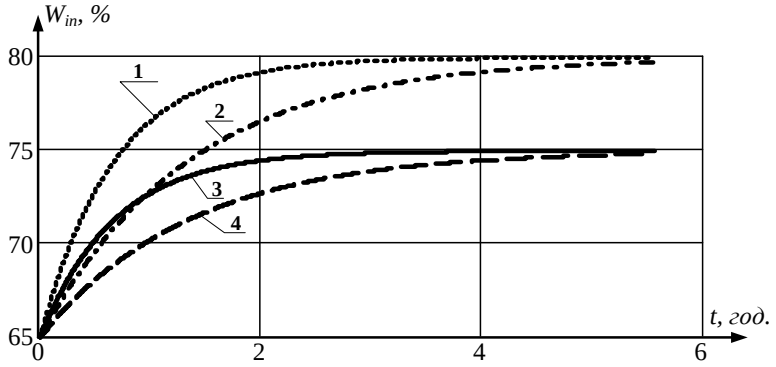
– часовий діапазон досягнення регламентованого сталого значення вологості повітря зони вирощування залежить від об'єму теплиць, типів і періоду вегетації й сезонного циклу вирощування та змінюється в діапазоні 1,5 год. до 2 год. за номінальної продуктивності систем зволоження й вентиляції;

– облік значної кількості атмосферних параметрів, конструктивних характеристик теплиць і фізико-біологічних процесів вирощування тепличних культур, а також наявність нелінійних функціональних зв'язків вологості повітря з наявним рівнем вологи в ґрунті та температурою повітря зони вирощування обумовлює необхідність побудови підсистеми моніторингу вологісного режиму вирощування тепличних культур.

На підставі проведених досліджень із розробки математичної моделі комп'ютеризованого моніторингу вологості повітря зони вирощування теплиць уточнено функціональну схему процедури агрегації та обробки вимірювальної інформації щодо вологісного режиму тепличного вирощування (рис. 3.4).



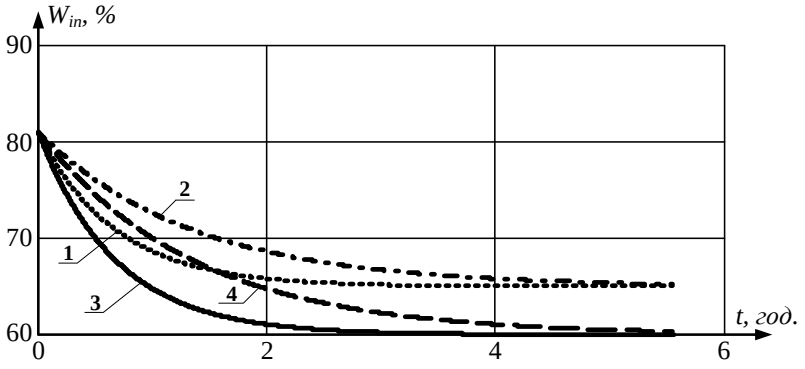
а) Осінньо-зимовий цикл



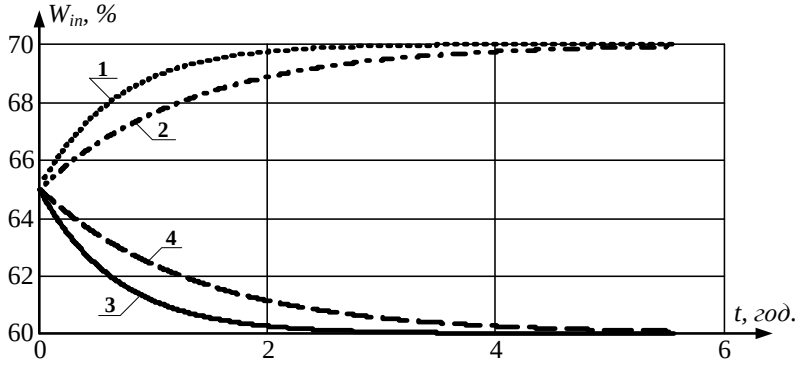
б) Весняно-літній цикл

Рисунок 3.2 – Результати моделювання зміни вологості повітря для огірків (*1* – Під час плодоношення, V_g=1875 м^3; *2* – Під час плодоношення, V_g=3750 м^3; *3* – До плодоношення, V_g=1875 м^3; *4* – До плодоношення V_g=3750 м^3)

На рис. 3.4 введено наступні позначення: $P_{air\ in}$ – тиск насиченої пари зони вирощування; $P_{air\ out}$ – тиск насиченої пари довколишнього середовища; $W_{air\ in}$ – відносна вологість повітря зони вирощування; $W_{air\ out}$ – відносна вологість повітря навколишнього середовища; $v_{air\ out}$ – швидкість руху потоків повітря навколишнього середовища; $D_{air\ out}$ – напрямок руху потоків повітря навколишнього середовища; r_v – відсоток відкриття механізмів системи вентиляції; k_{air} – кратність обміну повітрям; CON_{water} – витрата поливного розчину; CON_{steam} – витрата рідини для зволоження повітря.



а) Осінньо-зимовий цикл



б) Весняно-літній цикл

Рисунок 3.3 – Результати моделювання зміни вологості повітря для томатів (*1* – Під час плодоношення, V_g=1875 м^3; *2* – Під час плодоношення, V_g=3750 м^3; *3* – До плодоношення, V_g=1875 м^3; *4* – До плодоношення V_g=3750 м^3)

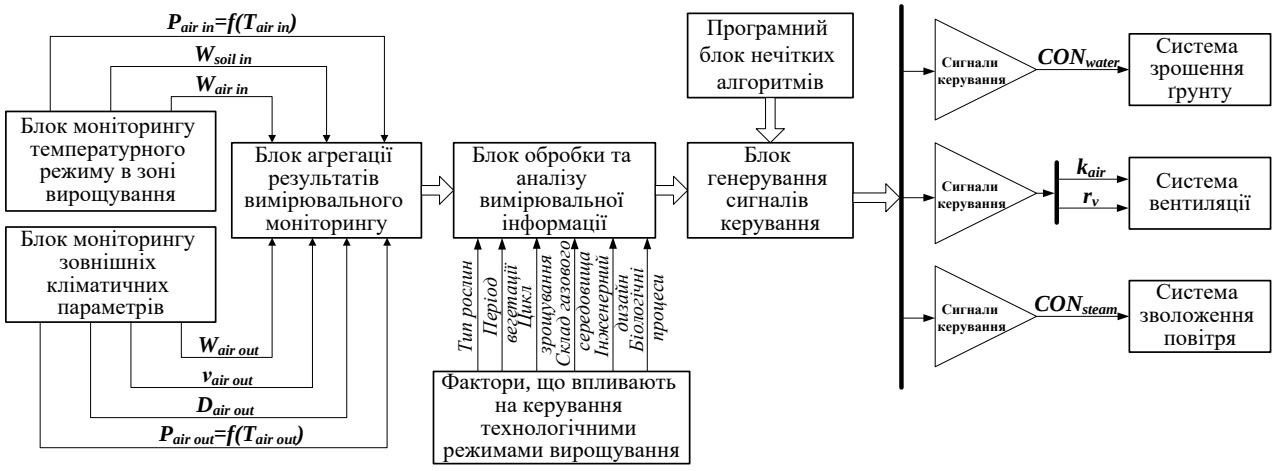


Рисунок 3.4 – Уточнена функціональна схема процедури моніторингу вологісного режиму вирощування

Отже, розроблена функціональна схема (рис. 3.4), дозволяє реалізувати функцію адаптивного до типів і періодів вегетації культур прецизійного керування технологічними режимами вирощування з обліком факторів сезонності та інженерного дизайну теплиць за результатами комп'ютеризованого вимірювального моніторингу характеристик внутрішнього мікроклімату й зовнішніх атмосферних параметрів у режимі реального часу.

3.2. Математична модель моніторингу динаміки вуглекислого газу в зоні вирощування теплиць

В якості базової технології під час побудови та дослідження математичної моделі моніторингу концентрації вуглекислого газу в зоні вирощування культур у тепличних умовах використано систему подачі чистого (зрідженого) вуглекислого газу з використанням труб малого діаметра, як показано на рис. 3.5. Така технологія дозволяє виконувати прецизійне автоматичне дозування вуглекислого газу з обліком добової динаміки фотосинтетичної активності, регулювати відстань від джерела CO_2 до рослин, а також рівномірно розподіляти газ у зоні вирощування теплиць. Однак, заявлений тип систем має ряд технологічних недосконалостей, які пов'язано з обмеженістю результатів досліджень щодо закономірностей оптимальної витрати CO_2 в залежності від типів вирощуваних культур і періодів їх вегетації, що призводить до відсутності алгоритмів адаптивного моніторингу режимів живлення рослин вуглекислим газом. Моделювання процесу динаміки вуглекислого газу для промислових теплиць виконувалося за умов і накладених обмежень, які наведено в табл. 3.2.

Таблиця 3.2 – Параметри й умови під час моделювання процесу моніторингу динаміки концентрації вуглекислого газу

Умова, що накладається	Прийняте обмеження
тип вирощуваних культур	індетермінантні сорти томатів та огірків
концентрація вуглекислого газу в області джерел у початковий момент часу	$C_{CO2}(0,0)=0,3$ %
концентрація вуглекислого газу в основі теплиці в початковий момент часу	$C_{CO2}(H,0)=0,15$ %
оптимальний для підживлення рівень концентрації вуглекислого газу, який встановлений в теплиці в початковий момент часу	$C_{max}=0,2$ %
коефіцієнт молекулярної дифузії вуглекислого газу	$D_{CO2}=0,14\cdot10^{-4}$ м^2/с – для томатів; $D_{CO2}=0,22\cdot10^{-4}$ м^2/с – для огірків
тип теплиці	овочева, цілорічного використання
матеріал теплиці	полікарбонат
висота теплиці	H=4 м
координати досліджуваної динаміки вуглекислого газу Z (відстань від джерела газу до локації вирощуваних культур)	Z_{11}=3,7 (висота куща томата в період висаджування h=0,3 м); Z_{12} = 2,8 (висота куща томата в період плодоношення h=1,2 м); Z_{21}=3,8 (висота куща огірка в період висаджування h=0,2 м); Z_{12} = 3,2 (висота куща томата в період плодоношення h=0,8 м)
фізичні процеси	ізотермічний процес

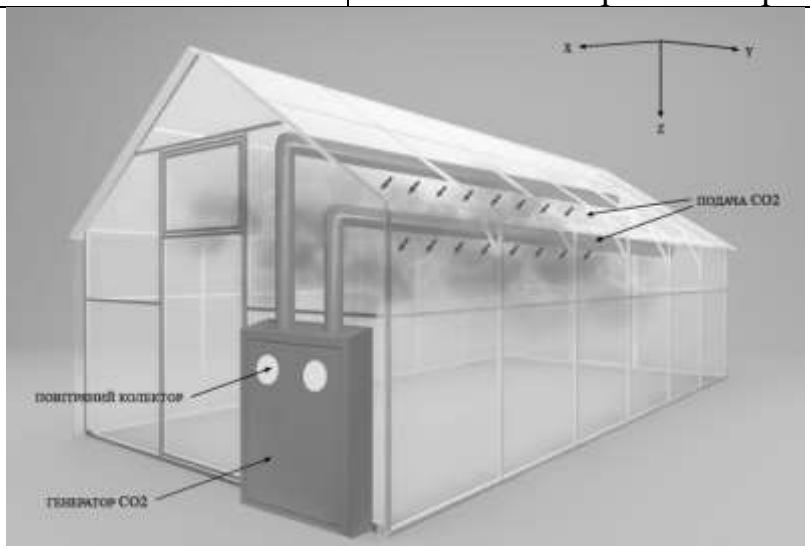


Рисунок 3.5 – Технологічна схема дозування вуглекислого газу в теплиці

В основу розроблюваної моделі процесу вимірювального моніторингу концентрації CO_2 покладено наступне рівняння балансу маси:

$$\varphi_{CO2}^{sour} - \varphi_{CO2}^{vent} - \varphi_{CO2}^{phot} = 0, \tag{3.2}$$

де φ_{CO2}^{sour} – кількість вуглекислого газу, що надходить до теплиці, %; φ_{CO2}^{vent} – кількість вуглекислого газу, що відводиться з теплиці, %; φ_{CO2}^{phot} – кількість вуглекислого газу, що споживається рослинами під час фотосинтезу, %. Поширення вуглекислого газу в зоні вирощування теплиць відбувається під впливом двох процесів, одним з яких є молекулярна дифузія, а іншим – перенесення молекул під час руху потоків повітря (конвекція). Зазвичай ці процеси протікають одночасно. Отже, з обліком рівняння (3.2) для ізотермічного випадку, рівняння конвективної дифузії CO_2 має такий вигляд:

$$\frac{\partial C_{CO2\,in}}{\partial t} = D_{CO2}\left(\frac{\partial^2 C_{CO2\,in}}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 C_{CO2\,in}}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 C_{CO2\,in}}{\partial z^2}\right) -$$
$$-\underbrace{\left(\overrightarrow{V_x}\frac{\partial C_{CO2\,in}}{\partial x} + \overrightarrow{V_y}\frac{\partial C_{CO2\,in}}{\partial y} + \overrightarrow{V_z}\frac{\partial C_{CO2\,in}}{\partial z}\right)}_{\varphi_{CO2}^{vent}} + \varphi_{CO2}^{sour}(x,y,z,t) - \varphi_{CO2}^{phot}(x,y,z,t), \tag{3.3}$$

де $C_{CO2\,in}$ – концентрація вуглекислого газу; D_{CO2} – коефіцієнт молекулярної дифузії вуглекислого газу; $\overrightarrow{V_x}$, $\overrightarrow{V_y}$, $\overrightarrow{V_z}$ – швидкість руху потоків повітря за відповідними координатами.

На підставі аналізу технологічних схем живлення рослин вуглекислим газом у тепличних умовах (рис. 3.3) і фізико-хімічних властивостей вуглекислого газу, введено припущення, що інтенсивність зміни концентрації вуглекислого газу за координатою *z* (висота) у порівнянні з координатами *x* (довжина) та *y* (ширина) набагато більше, так як CO_2 є важчим за чисте повітря, що призводить до його осідання в напрямку координати *z*. З аналізу допустимих швидкостей руху повітря в зоні вирощування встановлено, що градієнт концентрацій у напрямку координат *x* і *y* може бути прийнятий таким, що дорівнює нулю, що обґрунтовує припущення відсутності перенесення газу ($\partial^2 C_{CO2\,in}/\partial x^2 = 0$, $\partial^2 C_{CO2\,in}/\partial y^2 = 0$).

Розв'язання задачі побудови та аналізу математичної моделі процесу динаміки вуглекислого газу в умовах теплиць, яке описується рівнянням (3.2), може бути отримано з використанням методу джерел. Фізичний зміст цього методу полягає в отриманні поля концентрації вуглекислого газу, що утворюється розподіленими в просторі й часі точковими джерелами дифузії.

Отже, задачу, що розв'язується, можна сформулювати таким чином: теплиця є замкнутою системою, в якій протікають процеси виділення вуглекислого газу від точкових джерел, з початковим розподілом концентрації $C_{CO2\ in(0)}$ і граничними умовами $C_{CO2\ in}(0,t)=C_1$ і $C_{CO2\ in}(H,t)=C_2$; у початковий момент часу в теплиці досягнуто необхідний рівень концентрації вуглекислого газу $C_{CO2\ in(0)}=C_{max}$, і джерела дифузії вимкнуті ($\varphi_{CO2}^{sour}(x,y,z,t)=0$); конвективне масоперенесення вуглекислого газу відсутнє ($\varphi_{CO2}^{vent}(x,y,z,t)=0$); під час аналізу динаміки CO_2 у теплиці відбувається поглинання газу рослинами з рівномірною щільністю; оціночне значення інтенсивності поглинання CO_2 не залишається постійною величиною, а залежить від типів і періодів вегетації культур.

На підставі аналізу, викладених вище процесів динаміки вуглекислого газу в промислових теплицях, диференційне рівняння приймає такий вигляд:

$$\frac{\partial C_{CO2\ in}}{\partial t} = D_{CO2}\frac{\partial^2 C_{CO2\ in}}{\partial z^2} - \varphi_{CO2}^{phot}, \tag{3.4}$$

Розв’язання диференційного рівняння (3.4) з використанням методу функцій Гріна у загальному вигляді може бути знайдено з виразу:

$$C_{CO2\ in}(z,t) = f_1(z) + f_2(z,t) - f_3(z,t), \tag{3.5}$$

де $f_1(z)$ – функція, яка описує початковий розподіл концентрацій CO_2 у теплиці за нульових граничних умов і відсутності споживання газу; $f_2(z,t)$ – функція, яка описує граничні умови розподілу CO_2 у теплиці за нульових початкових умов і відсутності споживання газу; $f_3(z,t)$ – функція, яка описує споживання газу рослинами під час фотосинтезу за нульових початкових і граничних умов.

Таким чином, функція $f_1(z)$ у рівнянні (3.5) є рішенням для стаціонарної дифузії вуглекислого газу в умовах теплиць, тобто рішенням рівняння виду: $\partial^2 C_{CO2\ in} / \partial z^2 = 0$ з граничними умовами $f_1''(z)=0$, $f_1(0)=C_1$, $f_1(H)=C_2$:

$$f_1(z) = C_1 + \frac{z}{H}(C_2 - C_1), \tag{3.6}$$

де C_1 і C_2 – граничні концентрації вуглекислого газу в точках джерела газу і в області рослин, відповідно, %; H – відстань від джерела газу до грядок з рослинами, м; z – змінна інтегрування (координата), м.

Функція $f_2(z, t)$ є розв'язанням рівняння для нестаціонарного випадку:

$$\partial f_2 / \partial t = D_{CO2} \cdot \left(\partial^2 f_2 / \partial z^2 \right), \tag{3.7}$$

з простими граничними умовами $f_2(z,0)=C_{max}-f_1(z)$.

На підставі аналізу літературних джерел щодо нестаціонарних диференційних рівнянь математичної фізики отримано розв'язання диференційного рівняння (3.7):

$$\begin{aligned} f_2(z,t) = \frac{2}{\pi}\sum_{n=1}^{\infty}\left[\left(\frac{C_2\cdot\cos(n\pi)-C_1}{n\pi}\right)\cdot\sin\left(\frac{n\pi z}{H}\right)\cdot e^{-\frac{n^2\pi^2 D_{CO2}t}{H^2}}\right] + \\ + \frac{4}{\pi}C_{\max}\sum_{k=0}^{\infty}\frac{1}{2k+1}\cdot\sin\left(\frac{(2k+1)\pi z}{H}\right)\cdot e^{-\frac{(2k+1)^2\pi^2 D_{CO2}t}{H^2}}, \end{aligned} \tag{3.8}$$

де C_1 і C_2 – граничні концентрації вуглекислого газу в точках джерела газу і в області рослин, відповідно, %; n, k – порядковий номер імпульсу, який утворюється під час багаторазових відбиттів молекул CO_2 від стінок теплиці; H – відстань від джерела газу до грядок з рослинами (приблизно дорівнює висоті теплиці), м; C_{max} – необхідний рівень концентрації вуглекислого газу, який встановлено в теплиці в початковий момент часу, %; D_{CO2} – коефіцієнт молекулярної дифузії вуглекислого газу, м^2/с; z, t – змінні інтегрування (координата й час), відповідно, м та с.

Функція $f_3(z, t)$ у рівнянні (3.8), яка описує споживання газу рослинами під час фотосинтезу за нульових початкових і граничних умов, отримана шляхом

аналізу загального вигляду рівнянь математичної фізики, наведених у джерелах та має вигляд:

$$f_3(z,t)=\frac{4H^2\varphi_{CO2}^{phot}}{\pi^3 D_{CO2}}\sum_{n=0}^{\infty}\left(\begin{array}{l}\dfrac{1}{(2k+1)^3}\cdot\sin\left(\dfrac{2k+1}{H}\cdot z\right)\times\\ \times\left(1-e^{-\frac{(2k+1)^2 n^2 D_{CO2}t}{H^2}}\right)\end{array}\right), \tag{3.9}$$

де H – відстань від джерела газу до грядок із рослинами, м; φ_{CO2}^{phot} – кількість CO_2, що споживається рослинами в результаті фотосинтезу, %/с; D_{CO2} – коефіцієнт молекулярної дифузії CO_2, м^2/с; n, k – порядковий номер імпульсу; z, t – змінні інтегрування, відповідно, м та с.

Отже, отримано математичну модель, яка описує процеси динаміки вуглекислого газу в зоні вирощування теплиць:

$$\begin{aligned}C_{CO2\,in}(z,t)=&\underbrace{\left\{C_1+\frac{z}{H}(C_2-C_1)\right\}}_{f_1(z)}+\\ &+\underbrace{\left\{\begin{array}{l}\dfrac{2}{\pi}\sum_{n=1}^{\infty}\left[\left(\dfrac{C_2\cdot\cos(n\pi)-C_1}{n\pi}\right)\cdot\sin\left(\dfrac{n\pi z}{H}\right)\cdot e^{-\frac{n^2\pi^2 D_{CO2}t}{H^2}}\right]+\\ +\dfrac{4}{\pi}C_{\max}\sum_{k=0}^{\infty}\dfrac{1}{2k+1}\cdot\sin\left(\dfrac{(2k+1)\pi z}{H}\right)\cdot e^{-\frac{(2k+1)^2\pi^2 D_{CO2}t}{H^2}}\end{array}\right\}}_{f_2(z,t)}-\\ &-\left\{\underbrace{\frac{4H^2\varphi_{CO2}^{phot}}{\pi^3 D_{CO2}}\sum_{n=0}^{\infty}\left(\frac{1}{(2k+1)^3}\cdot\sin\left(\frac{2k+1}{H}\cdot z\right)\cdot\left(1-e^{-\frac{(2k+1)^2 n^2 D_{CO2}t}{H^2}}\right)\right)}_{f_3(z,t)}\right\},\end{aligned} \tag{3.10}$$

де C_1 і C_2 – граничні концентрації вуглекислого газу в точках джерела газу і в області рослин, %; H – відстань від джерела газу до грядок з рослинами, м; C_{max} – необхідний рівень концентрації вуглекислого газу, який встановлено в теплиці в початковий момент часу, %; D_{CO2} – коефіцієнт молекулярної дифузії CO_2, м^2/с;

φ_{CO2}^{phot} – кількість CO_2, що споживається рослинами під час фотосинтезу, %/с; n, k – порядковий номер імпульсу; z, t – змінні інтегрування, відповідно, м та с.

На підставі розробленої математичної моделі процесу вимірювального моніторингу концентрації вуглекислого газу в умовах промислових теплиць (3.10) з обліком необхідної для ефективного фотосинтезу заявлених вище типів і періодів вегетації культур концентрації CO_2 та її градієнта в замкнутому просторі отримано нормовані до максимального значення (C_{max}=0,2 %) характеристики динаміки двоокису вуглецю (рис. 3.6). На рис. 3.6 позначено: *1* – для індетермінантних сортів томатів до плодоношення, h=0,3 м; 2 – для індетермінантних сортів томатів під час плодоношення, h=1,2 м; *3* – для індетермінантних сортів огірків до плодоношення, h=0,2 м; 4 – для індетермінантних сортів огірків під час плодоношення, h=0,8 м.

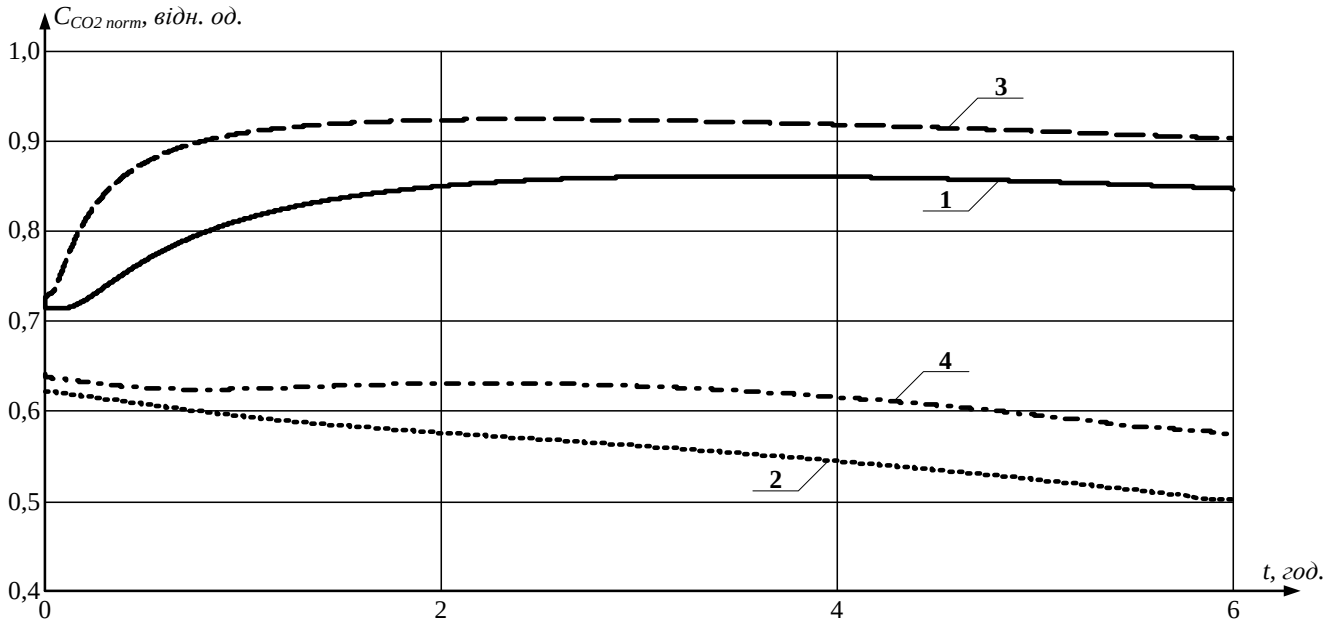


Рисунок 3.6 – Результати моделювання динаміки вуглекислого газу

Кількісний аналіз результатів моделювання процесу динаміки вуглекислого газу в умовах промислових теплиць, які наведено на рис. 3.6, довів, що він може бути розділений на характерні етапи, в яких: явища дифузії та фотосинтезу знаходяться в різних пропорціях між собою (від 0,2 до 2 год. у залежності від

типів і періодів вегетації культур) та сталий режим, у якому спостерігається рівновага дифузії та фотосинтезу практично рівні між собою (кутовий коефіцієнт нахилу функцій на рис. 3.6 наближується до нуля, від 2 до 5 год. у залежності від типів і періодів вегетації культур).

Таким чином, на підставі отриманих результатів розробки та дослідження математичної моделі процесу вимірювального моніторигу концентрації вуглекислого газу в зоні вирощування було встановлено перелік фізичних і конструктивних параметрів теплиць та фізико-біологічних факторів і явищ, які впливають на функціональні характеристики відповідних систем живлення тепличних культур двоокисом вуглецю, як показано на рис. 3.7.

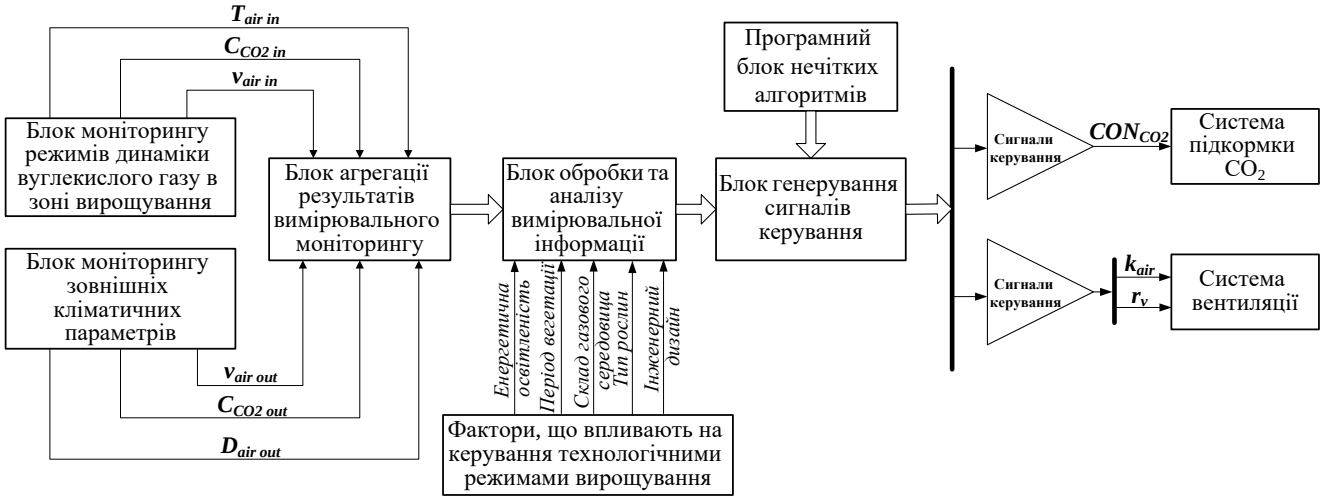


Рисунок 3.7 – Уточнена функціональна схема процедури моніторингу концентрації вуглекислого газу під час вирощування

На рис. 3.7 введено наступні позначення: $T_{air\ in}$ – температура повітря в зоні вирощування; $C_{CO2\ in}$ – концентрація двоокису вуглецю в зоні вирощування; $v_{air\ in}$ – швидкість руху потоків повітря в теплиці; $v_{air\ out}$ – швидкість руху потоків повітря навколишнього середовища; $C_{CO2\ out}$ – концентрація двоокису вуглецю в атмосфері довколишнього середовища; $D_{air\ out}$ – напрямок руху потоків повітря навколишнього середовища; r_v – відсоток відкриття механізмів системи вентиляції; k_{air} – кратність обміну повітрям; CON_{CO2} – витрата двоокису вуглецю.

Отже, розроблена функціональна схема, яку наведено на рис. 3.7, дозволяє

реалізувати функцію адаптивного до типів і періодів вегетації культур прецизійного керування технологічними режимами підкормки тепличних культур вуглекислим газом з обліком вищезаявлених інформативних параметрів і дестабілізуючих факторів за результатами комп'ютеризованого неруйнівного вимірювального моніторингу основних характеристик внутрішнього мікроклімату теплиць і зовнішніх атмосферних параметрів у режимі реального часу з подальшою нечіткою трансформацією вимірювальної інформації.

3.3. Вимоги до апаратно-програмного забезпечення інформаційної підсистеми моніторингу стану мікроклімату теплиць

Промислові тепличні комплекси являють собою складні інженерні споруди, в яких повинен забезпечуватись безперервний прецизійний моніторинг мікрокліматичних параметрів із подальшою автоматичною обробкою та інтерпретацією інтегрального стану мікроклімату зони вирощування, що в свою чергу, визначає темпи, обсяги та якість виробництва овочевої продукції. Методи математичного, фізичного та імітаційного моделювання біо- та агрофізичних процесів, що протікають у тепличних комплексах, все частіше використовуються в якості засобів інтерпретації результатів комплексних експериментальних досліджень і спостережень. Значний прогрес у вдосконаленні методів моделювання, а також їх успішного застосування в практичній діяльності обумовлено високими темпами розвитку в області комп'ютерних технологій під час вирішення задач чисельного моделювання процесів, що протікають в умовах вирощування овочевих культур у штучних агроекосистемах. Такий підхід дозволяє провести основні етапи циклу досліджень із розробки й проектування інформаційної підсистеми моніторингу стану мікроклімату теплиць різного ієрархічного рівня.

Наступним кроком формалізованого опису досліджуваної інформаційної підсистеми є визначення функцій належності локальних та глобального рішень на підставі результатів вимірювального моніторингу впливних фізичних

параметрів. Розроблено загальну структурну схему трансформації вимірювальної інформації, яку представлено на рис. 3.9 ($T_{air\ in}$ – температура повітря в зоні вирощування; $T_{air\ out}$ – температура повітря навколишнього середовища; T_{water} – температура поливного розчину; T_{soil} – температура ґрунту; $W_{air\ in}$ – вологість повітря зони вирощування; $W_{air\ out}$ – вологість повітря навколишнього середовища; W_{soil} – вологість ґрунту; $v_{air\ in}$ – швидкість руху повітря в зоні вирощування; $E_{e\ in}(\lambda)$ – енергетична освітленість зони вирощування; $E_{e\ out}(\lambda)$ – енергетична освітленість у довколишньому середовищі; $C_{CO2\ in}$ – концентрація двоокису вуглецю в зоні вирощування; $C_{CO2\ out}$ – концентрація двоокису вуглецю в повітрі навколишнього середовища; $D_{air\ out}$ – напрямок вітру навколишнього середовища; pH_{water} – кислотність поливного розчину; OPR_{water} – ОВП поливного розчину; EC_{water} – електропровідність поливного розчину).

3.4. Використання цифрового сенсора температури DS18B20 в інформаційній підсистемі

Як первинний блок вимірювання та керування використаємо плату Arduino. DS18B20 – це цифровий датчик температури, який досить простий у використанні. По-перше, він цифровий, а по-друге - у нього лише один контакт, з якого ми отримуємо корисний сигнал. Тобто можна підключити до одного Arduino одночасно величезну кількість цих сенсорів.

DS18B20 має різні форм-фактори. Доступно три варіанти: 8-Pin SO (150 mils), 8-Pin μSOP, та 3-Pin TO-92. Ці сенсори виготовляються з трьома вихідними контактами (чорний – GND, червоний – Vdd та білий – Data). Різні форм-фактори датчиків DS18B20 наведені на рис. 3.10. На рис. 3.11 наведено модель DS18B20 у вологозахищеному корпусі.

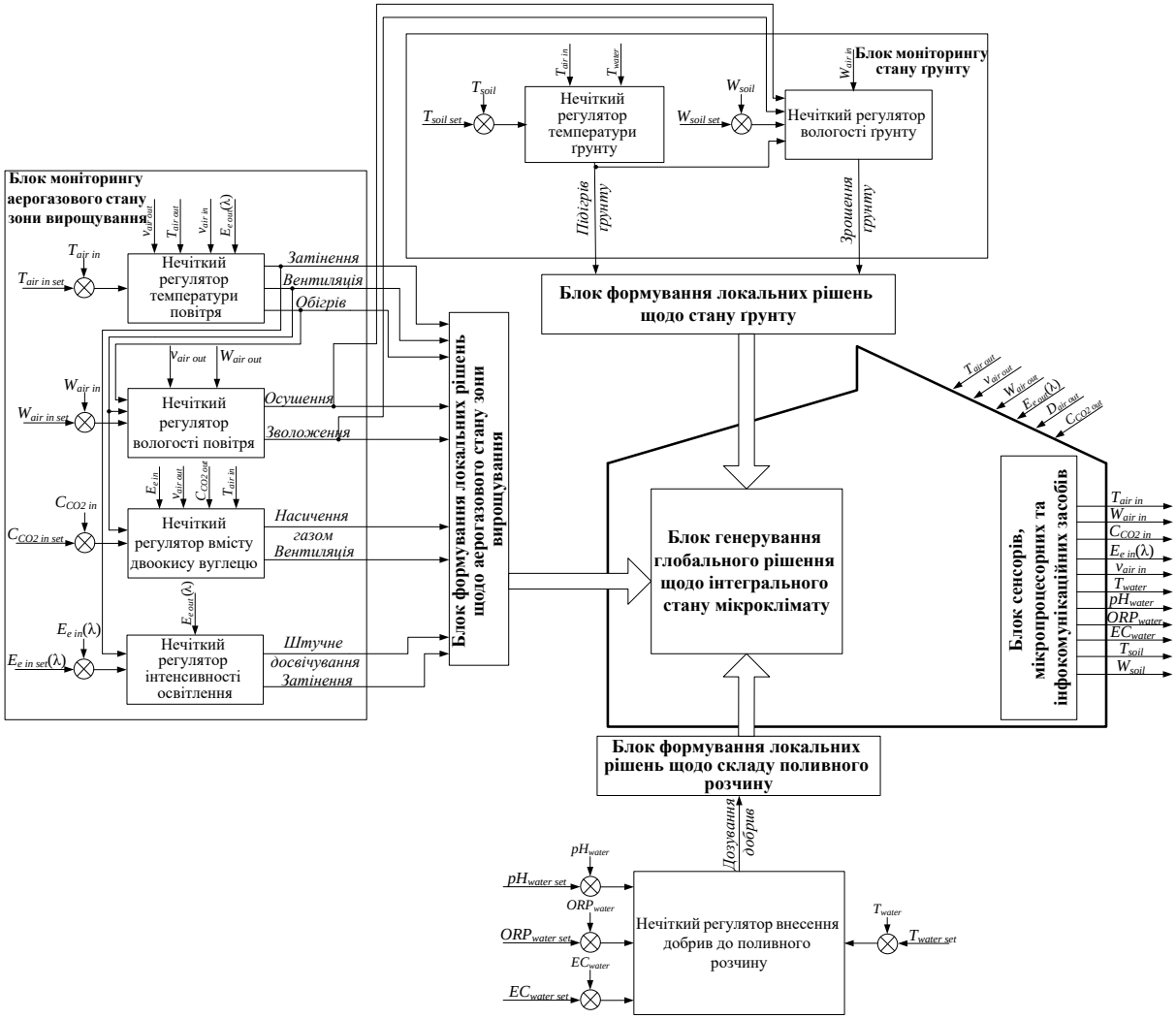


Рисунок 3.9 – Структурна схема трансформації вимірювальної інформації щодо інтегрального стану мікроклімату теплиць

DS18B20 зручний у використанні. Програмним шляхом робити запит до нього можна через контакт data (у такому разі використовується всього два контакти з трьох для підключення). Сенсор працює в діапазоні напруг від 3.0 до 5.5 В і вимірює температуру в діапазоні від -55°C до +125°C (від -67°F до +257°F) з точністю ±0.5°C (від -10°C до +85°C).

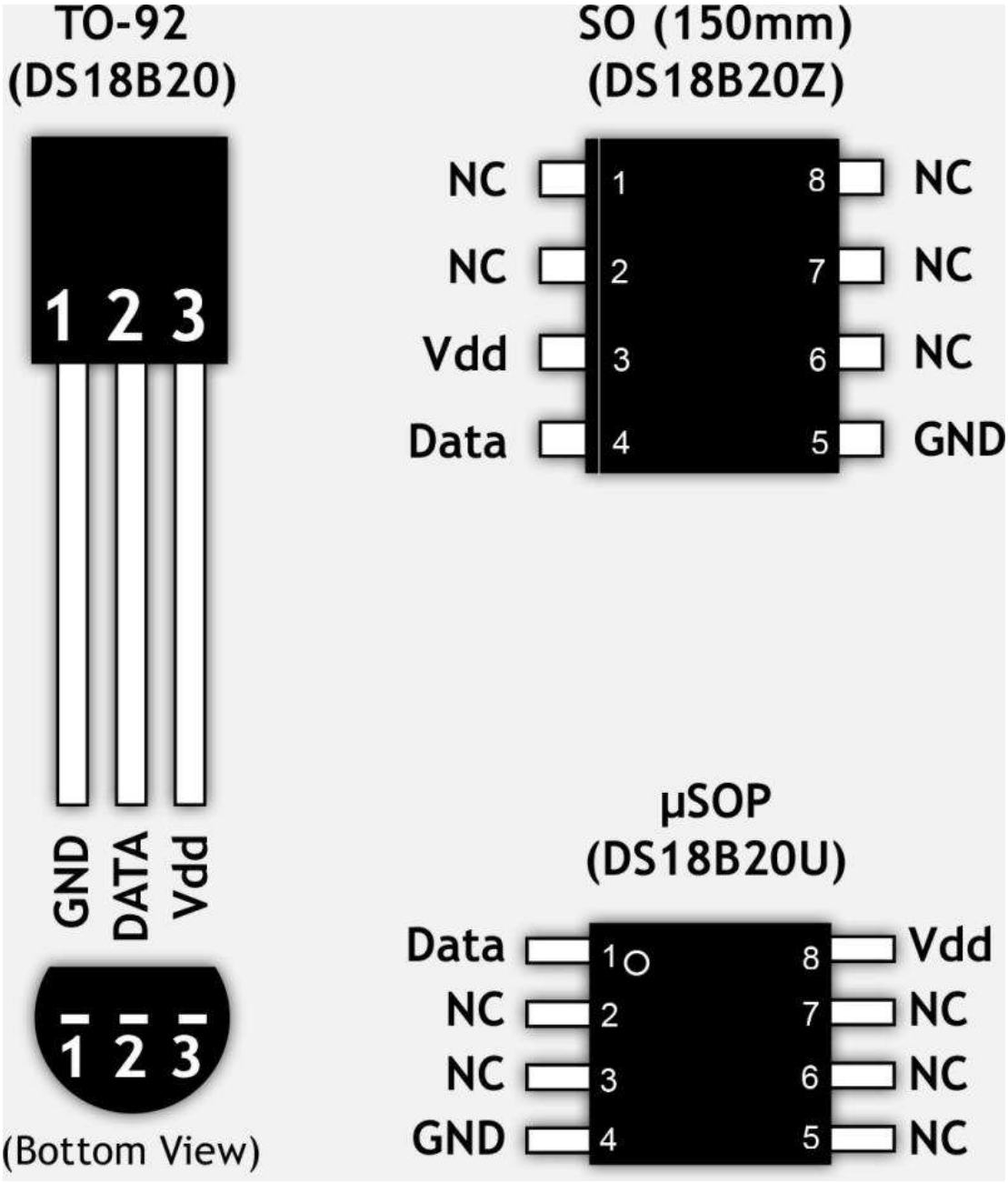


Рисунок 3.10 – Форм-фактори сенсора DS18B20

Ще одна особливість: можна підключити паралельно до 127 датчиків та зчитувати показання температури з кожного окремо. Для підключення потрібно завантажити з інтернету бібліотеку OneWire Library, яка входить у склад Arduino IDE.



Рисунок 3.11 – Модель сенсора DS18B20 у вологозахищеному корпусі

Підключення DS18B20 до Arduino. Датчик підключається просто. Контакт GND з DS18B20 підключається до GND Arduino. Контакт Vdd з DS18B20 підключається до +5V на Arduino. Контакт Data з DS18B20 підключається до будь-якого цифрового піну на Arduino. У цьому прикладі використовується пін 2. Єдине, що необхідно додати із зовнішньої додаткової обв'язки - це

підтягуючий резистор на 4.7 КОм. Схема підключення DS18B20 до Arduino показана на рис. 3.12 та на рис. 3.13.

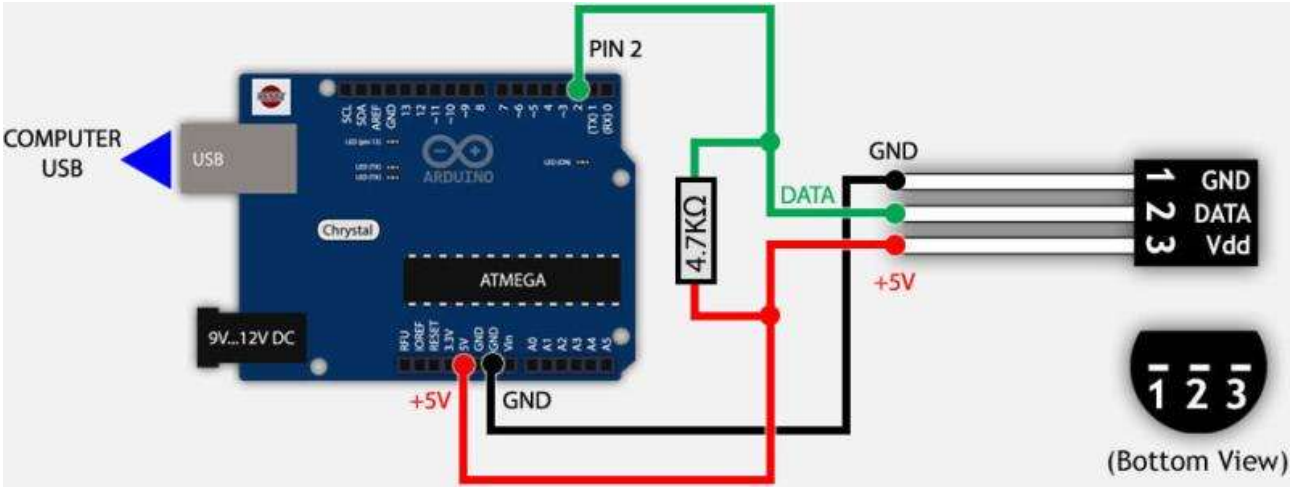


Рисунок 3.12 - Схема підключення DS18B20 до Arduino

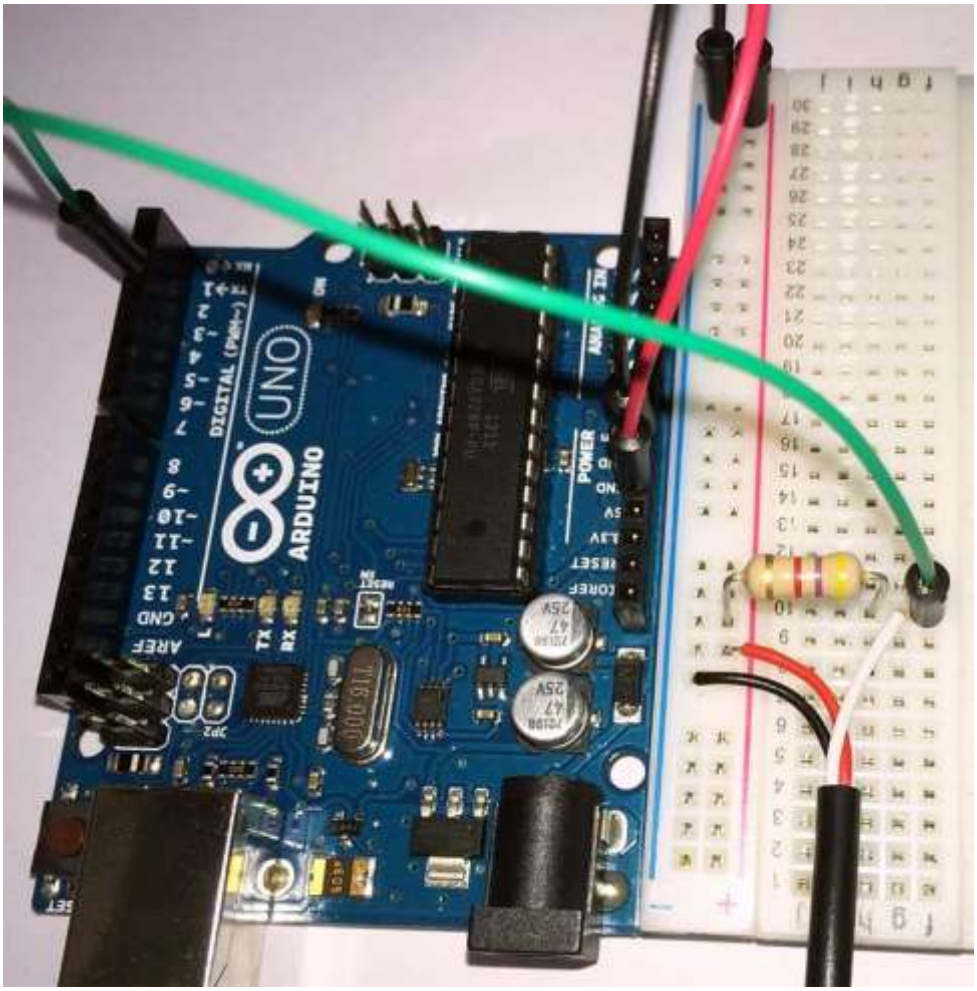


Рисунок 3.13 - Схема підключення DS18B20 до Arduino з використанням макетної плати

Завантаження скетчу на Arduino. Скетч, який представлений нижче, є у бібліотеці OneWire, у категорії examples. Перейдіть до "File" - "Examples" - "OneWire" і виберіть приклад "DS18x20_Temperature". Код програми наведено нижче. Даний приклад використовує бібліотеку OneWire Library, щоб зібрати дані з усіх підключених датчиків температури DS28B20 (як підключити кілька сенсорів описано в кінці статті) та відобразити їх у вікні серійного монітора Arduino IDE. У вікні серійного монітора можна побачити приблизно таке:

```
ROM = 28 88 84 82 5 0 0 6A
Мікросхема = DS18B20
Дані = 1 56 1 4B 46 7F FF A 10 D1 CRC=D1
Температура = 21,37 за Цельсієм, 70,47 за Фаренгейтом
Більше немає адрес.
ROM = 28 88 84 82 5 0 0 6A
Мікросхема = DS18B20
Дані = 1 56 1 4B 46 7F FF A 10 D1 CRC=D1
Температура = 21,37 за Цельсієм, 70,47 за Фаренгейтом
Більше немає адрес.
ROM = 28 88 84 82 5 0 0 6A
Мікросхема = DS18B20
Дані = 1 56 1 4B 46 7F FF A 10 D1 CRC=D1
Температура = 21,37 за Цельсієм, 70,47 за Фаренгейтом
Більше немає адрес.
```

Програма для роботи із сенсором DS28B20 на мові програмування С представлена в Додатку А. У рядку 10, де вказано "OneWire ds(2); встановлюється пін, якого підключений контакт data з сенсора. У програмі використаний Pin 2, але значення стандартного Pina в прикладі OneWire стоїть на 10. Можна використовувати і його. Пояснимо деякі елементи програми

1. Процедура ініціалізації швидкості передачі даних

```
void setup(void)
{
  Serial.begin(9600);
}
```

2. Головний цикл програми

```
void loop(void)
{
```

```
...
 }
```

3. Ініціалізація змінних

```
  byte i;
  byte present = 0;
  byte type_s;
  byte data[12];
  byte addr[8];
  float celsius, fahrenheit;
```

4. Пошук адреси сенсора і її друк

```
  if (!ds.search(addr))
   {
     Serial.println("No more addresses.");
     Serial.println();
     ds.reset_search();
     delay(250);
     return;
   }
  Serial.print("ROM =");
  for( i = 0; i < 8; i++)
   {
     Serial.write(' ');
     Serial.print(addr[i], HEX);
   }
 if (OneWire::crc8(addr, 7) != addr[7])
   {
     Serial.println("CRC is not valid!");
     return;
   }
 Serial.println();
// перший байт визначає чип
 switch (addr[0])
   {
   case 0x10:
     Serial.println(" Chip = DS18S20");
     type_s = 1;
     break;
   case 0x28:
     Serial.println(" Chip = DS18B20");
     type_s = 0;
     break;
```

```
     case 0x22:
       Serial.println(" Chip = DS1822");
       type_s = 0;
       break;
    default:
       Serial.println("Device is not a DS18x20 family device.");
  return;
}
```

5. Читання значень температури із сенсора із перевіркою контрольної суми

```
ds.reset();
ds.select(addr);
ds.write(0x44); // початок перетворення, використовуючи ds.write(0x44,1)
delay(1000); // затримка часу на перетворення
present = ds.reset();
ds.select(addr);
ds.write(0xBE);
Serial.print(" Data = ");
Serial.print(present, HEX);
Serial.print(" ");
for ( i = 0; i < 9; i++)
 {
   data[i] = ds.read();
   Serial.print(data[i], HEX);
   Serial.print(" ");
 }
Serial.print(" CRC=");
Serial.print(OneWire::crc8(data, 8), HEX);
Serial.println();
```

6. Конвертація отриманого коду в одиниці вимірювання температури

```
// конвертуємо дані у температуру
// так як результат є 16 бітним цілим, його потрібно зберігати в
// змінній з типом даних "int16_t", яка завжди дорівнює 16 бітам,
// навіть якщо ми проводимо компіляцію на 32-х бітному процесорі
int16_t raw = (data[1] << 8) | data[0];
if (type_s)
 {
   raw = raw << 3; // розрізнювальна здатність 9 біт за умовчанням
   if (data[7] == 0x10)
     {
```

```
        raw = (raw & 0xFFF0) + 12 - data[6];
      }
    }
    else
    {
      byte cfg = (data[4] & 0x60);
// при маленьких значеннях, малі біти не визначені
    if (cfg == 0x00) raw = raw & ~7; // розрізнювальна здатність 9 біт, 93.75 мс
    else if (cfg == 0x20) raw = raw & ~3; // розрізнювальна здатність 10 біт, 187.5 мс
    else if (cfg == 0x40) raw = raw & ~1; // розрізнювальна здатність 11 біт, 375 мс
    }
celsius = (float)raw / 16.0;
fahrenheit = celsius * 1.8 + 32.0;
Serial.print(" Temperature = ");
Serial.print(celsius);
Serial.print(" Celsius, ");
Serial.print(fahrenheit);
Serial.println(" Fahrenheit");
}
```

Можна підключити кілька цифрових датчиків температури DS18B20 паралельно. При цьому бібліотека OneWire library дозволить вам зчитувати дані з усіх датчиків одночасно. Нижче описано два методи підключення сенсорів. Для великої кількості сенсорів (більше 10), треба використовувати резистори з меншим опором (1.6 кОм). Крім того, при підключенні паралельно більше 10 датчиків, можуть виникнути проблеми (похибки під час знімання показань). Тому потрібно встановити додатковий резистор опором 100...120 Ом між контактом data на Arduino та data на кожному сенсорі.

Результат роботи попереднього скетчу з двома підключеними сенсорами може виглядати приблизно так:

```
ROM = 28 88 84 82 5 0 0 6A
Мікросхема = DS18B20
Дані = 1 51 1 4B 46 7F FF F 10 FE CRC=FE
Температура = 21,06 за Цельсієм, 69,91 за Фаренгейтом
ROM = 28 ТАК CA 27 5 0 0 49
Мікросхема = DS18B20
Дані = 1 4E 1 4B 46 7F FF 2 10 D9 CRC=D9
Температура = 20,87 за Цельсієм, 69,57 за Фаренгейтом
Більше немає адрес.
```

На рис. 3.14 наведено показано схему паралельного підключення кількох сенсорів з використанням трьох контактів при нормальному режимі живлення.

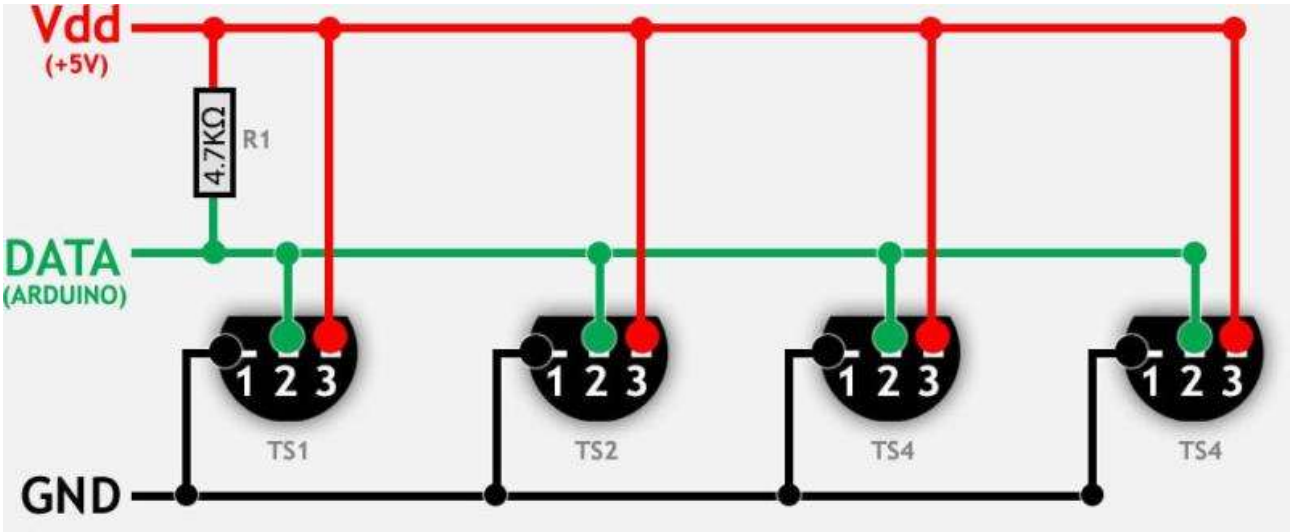


Рисунок 3.14 – Підключення кількох сенсорів на одну лінію з нормальним режимом живлення від контролера

На рис. 3.15 наведено показано схему паралельного підключення кількох сенсорів з використанням трьох контактів при паразитному режимі живлення. У паразитному режимі контакт Vdd залишається фактично не задіяний. Живлення датчика здійснюється через контакт data.

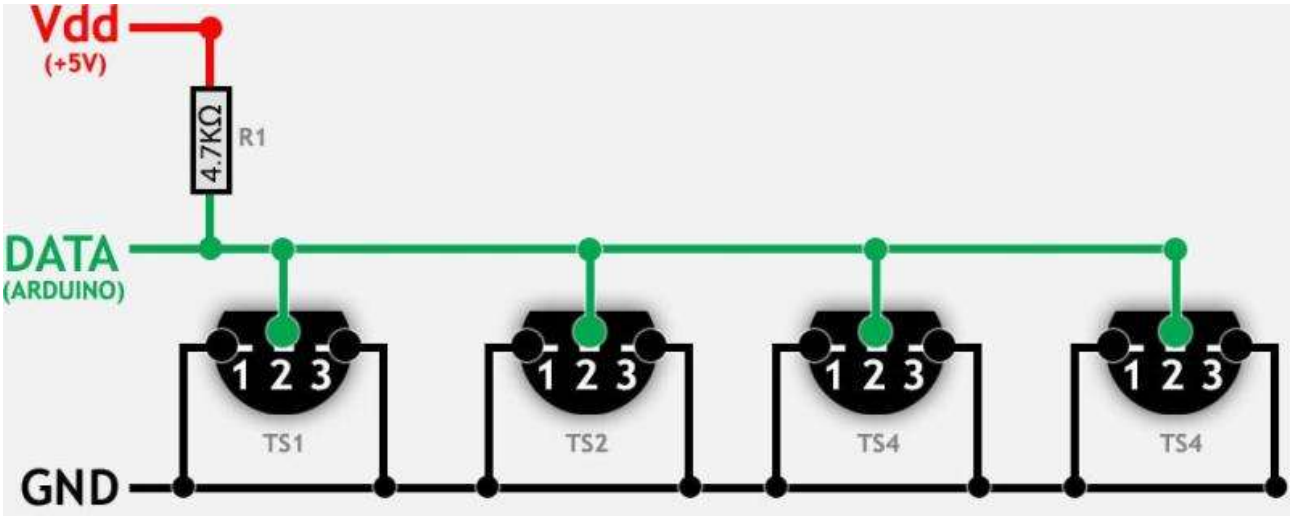


Рисунок 3.15 – Підключення кількох сенсорів на одну лінію з паразитним режимом живлення від контролера

ВИСНОВКИ

В першому розділі кваліфікаційної роботи бакалавра було обґрунтовано необхідність безперервного моніторингу наступних параметрів: температура повітря й ґрунту, інтенсивність сонячного опромінення, період освітлення, відносна вологість повітря і ґрунту, концентрація вуглекислого газу в повітрі, кислотність, електрична провідність, окислювально-відновлювальний потенціал і температура поливного розчину.

У другому розділі кваліфікаційної роботи бакалавра проаналізовано відомі технічні рішення з побудови інформаційних підсистем моніторингу стану мікроклімату теплиць. У результаті цього встановлено, що на сьогоднішній день недостатньо опрацьованими є питання апаратно-програмного та інформаційно-вимірювального забезпечення відповідних систем.

Проведено аналіз отриманих результатів щодо формалізованого опису досліджуваної підсистеми, зроблено висновок щодо доцільності й перспективності використання нечітких інтелектуальних технологій трансформації вимірювальної інформації щодо інтегрального стану мікроклімату теплиць із обліком існуючих нормативних документів, що враховують інженерний дизайн споруд захищеного ґрунту, а також типи й періоди вегетації вирощуваних культур.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Ting K.C., Lin T., Davidson P.C. Integrated urban controlled environment agriculture systems. In book: LED Lighting for Urban Agriculture. Singapore, 2016. P. 19–36.

2. Shamshiri R., Kalantari F., Ting K.C. , Thorp K.R., Hameed I.A., Weltzien C., Ahmad D., Shad Z.M. Advances in greenhouse automation and controlled environment agriculture: A transition to plant factories and urban agriculture. International Journal of Agricultural and Biological Engineering. 2018. Vol. 11 (1). – P. 1–22.

3. Nelkin J., Caplow T. Sustainable controlled environment agriculture for urban areas. Acta horticulturae. 2008. Vol. 801. P. 449–455.

4. Kacira M., Sase S., Okushima L. Optimization of vent configuration by evaluating greenhouse and plant canopy ventilation rates under wind-induced ventilation. Transactions of the American Society of Agricultural Engineers. 2004. Vol. 47 (6). P. 2059–2067.

5. Waaijenberg D., Sonneveld P.J. Greenhouse design for the future with a cladding material combining high insulation capacity with high light transmittance. Acta horticulturae. 2004. Vol. 633. P. 137 – 143.

6. Graefe J., Sandmann M. Shortwave radiation transfer through a plant canopy covered by single and double layers of plastic. Agricultural and Forest Meteorology. 2015. Vol. 201. P. 196–208.

7. Pollet I.V., Pieters J.G. PAR transmittances of dry and condensate covered glass and plastic greenhouse cladding. Agricultural and Forest Meteorology. 2002. Vol. 110 (4). P. 285–298.

8. Good agricultural practices for greenhouse vegetable crops: Principles for mediterranean climate areas / W. Baudoin et al. Rome: FAO, 2013. 640 p.

9. Good Agricultural Practices for greenhouse vegetable production in the South East European countries / W. Baudoin et al. Rome: FAO, 2017. 449 p.

10. American Society of Agricultural and Biological Engineers ANSI/ASAE EP406.4 JAN2003 (R2008) Heating, Ventilating and Cooling Greenhouses. URL: http://materialstandard.com/wp-content/uploads/2019/07/ANSI-ASABE-E P406-4-JAN2003-R2008.pdf

11. Hellickson M.A., Walker J.N. Ventilation of agricultural structures. St. Joseph: American Society of agricultural engineers, 1983. 372 p.

12. NGMA: Greenhouse Heating Efficiency Design Considerations. URL: https://www.hort.vt.edu/ghvegetables/documents/Greenhouse%20Heating_Energy/HeatingEffnNGMA.pdf

13. Food and agriculture organization of the united nations: FAOSTAT. URL: http://www.fao.org/faostat/en/#home

14. Both A.J., Benjamin L., Franklin J., Holroyd G., Incoll L.D., Lefsrud M.G., Pitkin G. Guidelines for measuring and reporting environmental parameters for experiments in greenhouses. Plant Methods. 2015. Vol. 11 (43). P. 1–18.

15. ВНТП АПК-19-07. Тепличні і оранжерейні підприємства. Споруди захищеного грунту для фермерських (селянських) господарств: Відомчі норми технологічного проектування. [Чинний від 2007-08-01]. Вид. офіц. Київ: М-во аграр. політ. України, 2007. 140 с.

16. NCERA-101: Committee on Controlled Environment Technology and Use.URL:https://www.controlledenvironments.org/wpcontent/uploads/sites/6/2017/05/Greenhouse-Guidelines.pdf

17. Laktionov I., Vovna O., Zori A. Copncept of low cost computerized measuring system for microclimate parameters of greenhouses. Bulgarian Journal of Agricultural Science. 2017. Vol. 23 (4). P. 668–673.

18. Jorgensen M.H. Agricultural field production in an ‘Industry 4.0’ concept. Agronomy Research. 2018. Vol. 16 (1). P. 94–102.

19. Chybowski L, Gawdzinska K.. Selected issues regarding achievements in component importance analysis for complex technical systems. Scientific Journals of

the Maritime University of Szczecin. 2017. Vol. 52 (144). P. 137–144.

20. Espiritu J.F., Coit D.W., Prakash U. Component criticality importance measures for the power industry. Electric Power Systems Research. 2007. Vol. 77. P. 407–420.

21. Kuo W., Zhu X. Importance Measures in Reliability, Risk, and Optimization: Principles and Applications. Hoboken: John Wiley & Sons Inc., 2012. 472 p.

22. Chybowski L. Application of External Events Vectors for Defining Reliability Structure of Fishing Vessels Power, Propulsion and Technological Plants. Polish Journal of Environmental Studies. 2009. Vol. 18 (2A). P. 45–50.

23. VYR: Importance measures for the dynamic flowgraph methodology. URL: https://www.vtt.fi/inf/julkaisut/muut/2011/VTT-R-00525-11.pdf

24. Ministry of Agriculture and Forestry: Supports the growth, diversification and sustainability of Alberta's agriculture and forest industries. URL: https://www.alberta.ca/agriculture-and-forestry.aspx

25. Ahn Y.D., Bae S., Kang S.-J. Power Controllable LED System with Increased Energy Efficiency Using Multi-Sensors for Plant Cultivatio. Energies. 2017. Vol. 10 (1607). P. 1–13.

26. Vu Q.M. Automated Wireless Greenhouse Management System: Master of Engineering Thesis / School of Engineering and Advanced Technology Massey University, Palmerston North, 2011. 173 p.

27. Shirsath D.O., Kamble P., Mane R., Kolap A., More R.S. IoT based smart greenhouse automation using Arduino. International Journal of Innovative Research in Computer Science & Technology. 2017. Vol. 5 (2). P. 234–238.

28. Zade A.V., Harwani S., Bawankule P. A smart green house automation system by wireless sensor networks. International Journal of Research in Advent Technology. 2017. Vol. 5 (3). P. 48–50.

29. Xu F., Chen J., Zhang L., Zhan H. Self-tuning Fuzzy Logic Control of Greenhouse Temperature using Real-coded Genetic Algorithm. 9th International

Conference on Control, Automation, Robotics and Vision (Singapore, 05 Dec. 2006). Singapore, 2006. P. 1–6.

30. Pan H., Xing W., Xu S., Lin X. Design of a new intelligent fuzzy control system of greenhouse temperature. 7th World Congress on Intelligent Control and Automation (Chongqing, 25 – 27 Jun. 2008). Chongqing, 2008. P. 8869–8872.

31. Ito K., Hara Y. Multipoint-measurement multipoint-heating greenhouse temperature control with wooden pellet fuel using an adaptive model predictive control approach with a genetic algorithm. 25th Mediterranean Conference on Control and Automation (MED) (Valletta, 03 – 06 July 2017). Valletta, 2017. P. 54 – 59.

32. Tykhan M., Dilay I., Markovych V. Study of the influence of a fast changing temperature on metrological characteristics of the tensoresistive pressure sensor. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. 2018. Vol. 1 (7). P. 30–37.

33. Du Y.S., Ma J., Qin L.L., Zhang H.B., Wu G. Application of generalized predictive control algorithm for temperature control in modern greenhouse. 35th Chinese Control Conference (CCC) (Chengdu, 27 – 29 July 2016). Chengdu, 2016. P. 4342–4347.

34. Robles Algarin C., Polo Llanos A. Low-Cost Fuzzy Logic Control for Greenhouse Environments with Web Monitoring. Electronics. 2017. Vol. 6 (71). P. 1–12.

35. Faouzi D., Bibi-Triki N., Mohamed B., Abene A. Optimization, Modeling and Simulation of Microclimate and Energy Management of the Greenhouse by Modeling the Associated Heating and Cooling Systems and Implemented by a Fuzzy Logic Controller using Artificial Intelligence. Informatica. 2017. Vol. 41. P. 317–331.

36. Chandraprabha M., Uma K. Controlling of Green House Parameters through GSM and LabVIEW System. International Journal for Scientific Research & Development. 2017. Vol. 5 (7). P. 358–362.